

WYNIKI BADAŃ MATERII ORGANICZNEJ, HISTORII POGRAŻANIA I EWOLUCJI TERMICZNEJ

Piotr KLECZYŃSKI

CHARAKTERYSTYKA PETROGRAFICZNA ORAZ DOJRZAŁOŚĆ TERMICZNA MATERII ORGANICZNEJ ROZPROSZONEJ

WSTĘP

Charakterystykę petrograficzną rozproszonej materii organicznej w otworze Maciejowice IG 1 wykonano na podstawie danych pochodzących z analizy 14 próbek z interwału głęb. 1852,5–3403,0 m (karbon). Badania mikroskopowe wraz z ich analizą, interpretacją oraz ustaleniem wniosków zostały wykonane w latach wcześniejszych przez I. Grotek (Grotek i in., 2000a). Próbki i preparaty pochodzące z analiz nie były dostępne na potrzeby tego opracowania. Dodatkowo w tabeli 27 umieszczono informacje o wartości refleksyjności wityryny z pojedynczych próbek permio-mezozoiku: z kredy dolnej (1020,0 m), triasu górnego (1500,0 m) oraz pogranicza permu i triasu (1762,5 m).

Dane te pochodzą z archiwum CBDG. Inne informacje o interwale 1020,0–1762,5 m nie były dostępne. Prezentowany w poniższym rozdziale tekst bazuje na wymienionych materiałach i przedstawia je w sposób usystematyzowany w jednym miejscu.

Badania mikroskopowe wykonano w świetle odbitym białym oraz ultrafioletowym, co umożliwiło identyfikację poszczególnych macerałów grupy liptynytu. Ocenę dojrzałości materii organicznej (OM, ang. *organic matter*), zawartej w omawianym interwale, wykonano na podstawie pomiarów zdolności refleksyjności wityryny w utworach karbonu. Określenie dojrzałości OM w powyższy sposób jest

Tabela 27

Analiza mikroskopowa materii organicznej rozproszonej w profilu utworów karbonu–kredy dolnej z otworu Maciejowice IG 1 (Grotek i in., 2000a)

Microscope analysis of the organic matter dispersed in the Carboniferous–Lower Cretaceous deposits from the Maciejowice IG 1 borehole (Grotek *et al.*, 2000a)

Głębokość Depth	Wiek Age	Litologia Lithology	Wityrynit Vitrinite	Inertynit Inertinite	Liptynit Liptinite	Sapropel	R _o	R _{red}
[m]			[%]					
1020,0	kreda dolna	piaskowiec	x	x	x	x	0,62	x
1500,0	trias górny	iłowiec	x	x	x	x	0,52	x
1762,5	perm?/trias?	piaskowiec	x	x	x	x	0,53	x
1852,5	karbon (moskow)	iłowiec	85	5	10	0	0,67	0,80
2058,0		mułowiec	30	30	40	0	0,70	0
2161,0		iłowiec/mułowiec	90	0	10	0	0,66	0,85
2274,0		piaskowiec	60	20	20	0	0,66	0,85
2395,0		mułowiec	60	10	30	0	0,65	1,15
2512,8		iłowiec/mułowiec	50	10	20	20	0,67	1,12
2637,0		iłowiec/mułowiec	70	10	10	10	0,67	1,12
2763,0	karbon (baszkir)	iłowiec/mułowiec	70	10	10	10	0,72	1,18
2843,0		łupek	60	5	20	15	0,73	1,23
2995,0		iłowiec/mułowiec	70	5	5	20	0,75	0
3085,0		iłowiec	70	0	10	20	0,73	0
3313,0	karbon (serpuchow)	mułowiec	30	10	40	20	0,69	0,84
3362,0		iłowiec	10	0	0	90	0,73	0
3403,0		iłowiec	50	10	10	30	0,71	0

możliwe dzięki liniowemu wzrostowi zdolności odbicia światła wraz ze wzrostem stopnia przeobrażenia witrinitu (Stach i in., 1982; Taylor i in., 1998). Wyniki pomiarów dla danej próbki, wykonane na izotropowym witrynie, są przedstawione jako średnia wartość (%) przypadkowych pomiarów w obrębie tej próbki i są oznaczone symbolem R_o .

Analizy wykonano za pomocą mikroskopu polaryzacyjnego Axioskop firmy Zeiss wyposażonego w przystawkę mikrofotometryczną MPM 200 umożliwiającą pomiar zdolności refleksyjności materii organicznej. Badania wykonano przy użyciu wzorców ze szkła optycznego o określonej, stałej refleksyjności wynoszącej 0,4958%, 0,9207% i 1,0058%. Dodatkowo zastosowano filtr monochromatyczny o długości fali 546 nm, blendę pomiarową o wielkości 0,16 mm oraz olejek immersyjny o $n_D = 1,515$ w temp. 20–25°C (Grotek i in., 2000a).

Macerały grupy liptynit, jak podaje Grotek i in. (2000a), analizowano od strony jakościowej przy użyciu lampy rtęciowej HBO 100W/2. Wykorzystano światło niebieskie o długości fali 395–440 nm. Opis poszczególnych składników materii organicznej był wykonany przez Grotek i in. (2000a) zgodnie z nomenklaturą i klasyfikacją przyjętą przez Międzynarodowy Komitet Petrologii Węgla (ICCP – International Committee for Coal and Organic Petrology).

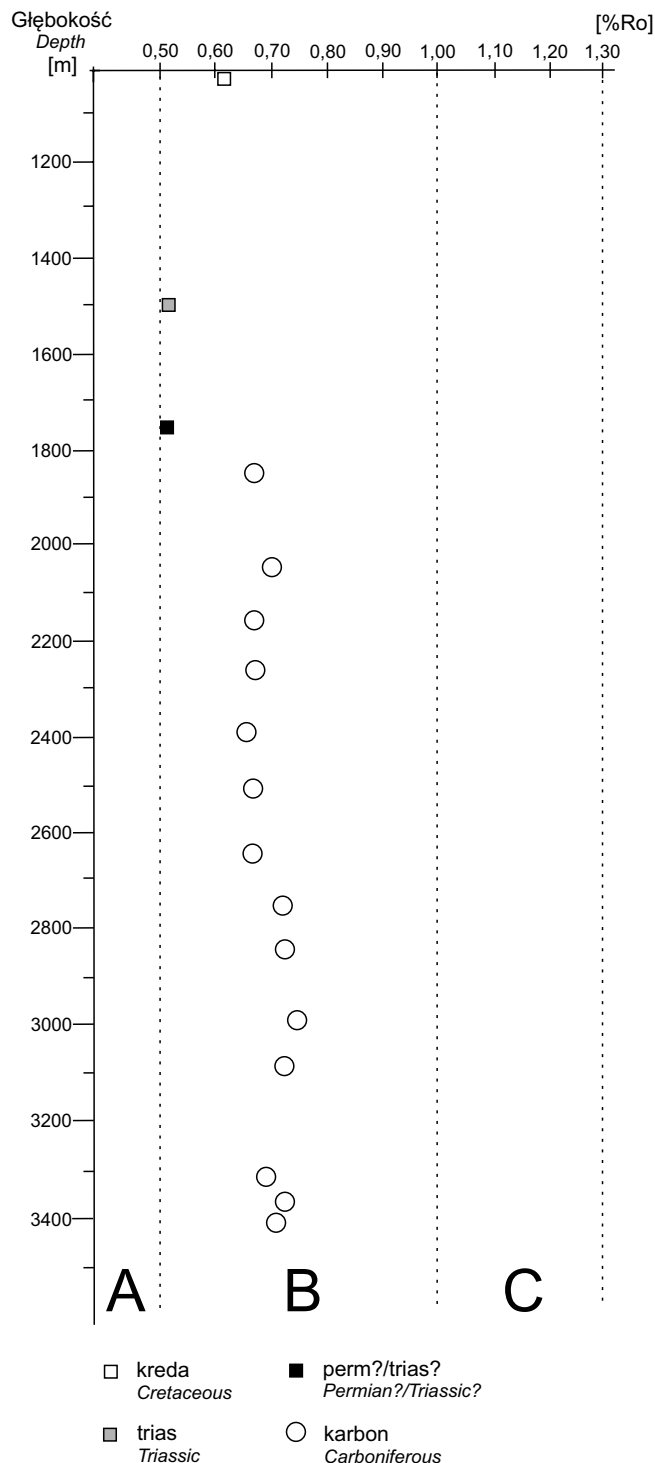
W czasie analiz składu petrograficznego wykorzystano analizę jakościową oraz szacunkowo ilościową, co pozwoliło na uzyskanie pełnej informacji o składzie materii organicznej w badanym materiale. Rejestrowano trzy podstawowe grupy macerałów węgla (witrinit, inertynit, liptynit) i asocjację ilasto-organiczną typu sapropelowego (fig. 37; Grotek i in., 2000a).

Fig. 37. Zmiany wartości współczynnika refleksyjności witrinitu w profilu utworów karbonu–kredy w otworze Maciejowice IG 1

A. Osady niedojrzałe. B. Główna faza generowania ropy naftowej.
C. Faza generowania gazów mokrych i kondensatów

Values of vitrinite reflectance index versus depth in the profile of the Carboniferous–Cretaceous deposits in the Maciejowice IG 1 borehole

A. Immature sediments. B. Main phase of oil generation.
C. Phase of wet gas and condensate generation



WYNIKI ANALIZY MIKROSKOPOWEJ

Charakterystyka macerałów

Przebadano 14 próbek pochodzących z utworów karbonu (serpuchow, baszkir, moskow) z interwału głęb. 1852,5–3403,0 m. Próbki są zbudowane z utworów klastycznych, są to iłowce, mułowce, piaskowce oraz łupki.

Materia organiczna jest w zdecydowanej większości autogeniczna, choć zdarzają się fragmenty redeponowane. Mate-

riał autogeniczny występuje w formie lamin i soczewek o grubości zmieniającej się od 3 do 60 μm . Materiał redeponowany stanowią słabo obtoczone okruchy o zróżnicowanej długości od 5 do 120 μm . Niski stopień obtoczenia świadczy o stosunkowo krótkim transporcie redeponowanych ziaren (Grotek i in., 2000a). Skład petrograficzny materii organicznej jest zdominowany przez macerały witrinitowe, takie jak

kolotelinit i telinit. W 11 z 14 próbek ich zawartości są równe lub większe niż 50%. W dwóch próbkach z głębokości 1852,5 i 2161,0 m przekraczają nawet 80% zawartości (tab. 27).

Zawartość składników inertynitowych waha się od 0 do 30% i zazwyczaj wynosi 10% (tab. 27). Macerały liptynitowe charakteryzują się intensywną fluorescencją w barwach żółto-pomarańczowych we wszystkich badanych próbkach (Grotek in., 2000a). Ich zawartość zmienia się od 0 do 40% (tab. 27). Szczególnie bogate w macerały grupy liptynitów są próbki z głębokości 2058,0 m oraz 3313,0 m (tab. 27). Materia organiczna typu sapropelowego występuje obficie w próbkach z otworu Maciejowice IG 1. Tam, gdzie asocjacja mineralno-organiczna występuje, jej zawartość zazwyczaj waha się od 10 do 30%. Wyjątkowo wysoką zawartość materii organicznej tego typu stwierdzono w próbce z głęb. 3362,0 m, gdzie wynosi ona 90% (tab. 27).

Refleksyjność wityrynytu i dojrzałość termiczna

Z utworów permo-mezozoiku dostępne są trzy pomiary refleksyjności wityrynytu: z kredy dolnej (głęb. 1020,0 m) o wartości 0,62%, z triasu górnego (głęb. 1500,0 m) o war-

tości 0,52% oraz z pogranicza permu i triasu (głęb. 1762,5 m) o wartości 0,53%. Utwory permo-mezozoiku wykazują niższą refleksyjność wityrynytu niż zbadane utwory karbonu. Pozostałe dane o redeponowanej materii organicznej nie są dostępne.

Autochtoniczna materia organiczna w utworach karbonu, występująca w analizowanych próbkach z otworu Maciejowice IG 1, jest słabo przeobrażona. Świadczą o tym niskie wartości wskaźnika refleksyjności wityrynytu (R_o) badanego w materii organicznej *in situ*, mieszczące się w przedziale 0,65–0,75% (tab. 27). Dodatkową wskazówką świadczącą o niskim stopniu przeobrażenia próbek jest intensywna fluorescencja macerałów liptynitów (Grotek i in., 2000a). Na podstawie powyższych informacji należy stwierdzić, że badane osady wykazują stopień dojrzałości termicznej odpowiadającej głównej fazie generowania ciekłych węglowodorów (fig. 37; Grotek i in., 2000a).

Słabo obtoczone ziarna redeponowanej materii organicznej wykazują wyższe wartości refleksyjności wityrynytu od autochtonicznych składników materii organicznej. Wartości (R_{red}) materii redeponowanej mieszczą się w przedziale 0,80–1,23% (tab. 27).

Ewa KLIMUSZKO

CHARAKTERYSTYKA GEOCHEMICZNA MATERII ORGANICZNEJ

WSTĘP

W otworze Maciejowice IG 1 badania geochemiczne materii organicznej były przeprowadzone dla utworów syluru (przydol), dewonu dolnego i górnego, karbonu, a także jednostkowo utworów permu, pogranicza permu i triasu, triasu górnego, jury górnej i kredy dolnej. Wykonano oznaczenia zawartości węgla organicznego, ilościowe oznaczenie bituminów, a także podział na frakcje w bituminach wydzielonych ze skały (węglowodory nasycone, aromatyczne, asfaltyny i żywice).

Szczegółowe badania frakcji węglowodorów nasyconych, czyli oznaczenie zawartości poszczególnych n-alka-

nów i węglowodorów izoprenoidowych, przeprowadzono dla wybranych próbek z utworów syluru, dewonu, karbonu i triasu. Badania biomarkerów z grupy terpanów i steraanów, określające typ genetyczny, stopień przeobrażenia i środowisko depozycji materii organicznej, w rozszerzonym zakresie były przeprowadzone jedynie dla pojedynczych próbek z utworów syluru, dewonu i karbonu. Analizy geochemiczne do tego opracowania były wykonywane w Centralnym Laboratorium Chemicznym PIG-PIB.

ILOŚĆ OZNACZONEJ MATERII ORGANICZNEJ

W ilowcowych utworach syluru (przydol) ilość węgla organicznego jest bardzo mała (tab. 28, fig. 38). Ilość wydzielonych bituminów z tych utworów jest zróżnicowana od śladowej (0,002%) do wyższej 0,020% i generalnie jest

mała. W składzie bituminów występuje duża zawartość węglowodorów, mających cechy epigenetycznych z osadem. Epigenetyczny charakter związków węglowodorowych sugeruje wartość współczynnika migracji. Współczynnik

K₁ – Lower Cretaceous, J₃ – Upper Jurassic, T₃ – Upper Triassic, P/T – Permian/Triassic boundary interval, Pz – Permian, Zechstein, Cm – Carboniferous, Moscovian, Cb – Carboniferous, Bashkirian, Cs – Carboniferous, Serpukhovian, Cv – Carboniferous, Visean, D₃ – Upper Devonian, D1 – Lower Devonian, S – Silurian; ZLP – conglomerate, PSC – sandstone, MLC – mudstone, ILC – claystone, LPK – shiste, WAP – limestone, DOL – dolomite, MRL – marl; content of bitumens [%] – content of bitumens extracted with rocks; total organic carbon [%] – content of total organic carbon in rock; hydrocarbons in bitumens [%] – composition of hydrocarbons in bitumens extracted with rocks; hydrocarbons in rock [%] – composition of hydrocarbons in total analyzed rock in Gondek (1980); saturated hydrocarbons in bitumens [%] – composition of saturated hydrocarbons in bitumens extracted with rock; aromatic hydrocarbons in bitumens [%] – composition of aromatic hydrocarbons in bitumens extracted with rock; resins and asphaltens [%] – composition of resins and asphaltens in bitumens extracted with rock; coefficient migration – the ratio of the contents of hydrocarbons in rock to the TOC contents in rock (Gondek, 1980)

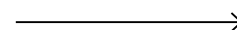


Tabela 28

Dane geochemiczne z otworu wiertniczego Maciejowice IG 1
Geochemical data from Maciejowice IG 1 borehole

Głębokość Depth [m]	Stratygrafia Stratigraphy	Litologia Lithology	Zawartość bituminów Content of bitumens [%]	Zawartość Corg Total organic carbon [%]	Zawartość węglowodorów w bituminach Hydrocarbons content in bitumens [%]	Zawartość węglowodorów w skale Hydrocarbons content in rock [%]	Zawartość węglowodorów nasyconych Saturated hydrocarbons content [%]	Zawartość węglowodorów aromatycznych Aromatic hydrocarbons content [%]	Zawartość żywic i asfaltenu Resines and asphaltenes content [%]	Współczynnik migracji Coefficient migration
1023,0	K ₁	MRL	0,006	0,56						
1384,5	J ₃	WAP		0,08						
1500,0	T ₃	ZLP	0,008	0,10	69,0	0,006	51,0	18,0	31,0	0,060
1762,5	?P/?T	PSC		0,06						
1845,7	Pz	LPK	0,003	0,08	46,4	0,004	32,0	14,4	53,6	0,050
1852,5	Cm	LPK	0,011	4,83						
1896,2	Cm	MLC	0,006	0,50						
1928,5	Cm	MLC	0,002	0,60						
2058,0	Cm	LPK	0,005	0,96						
2154,0	Cm	MLC	0,005	0,74						
2324,0	Cm	MLC	0,009	0,89						
2363,5	Cm	MLC	0,012	1,95	47,0	0,005	19,0	28,0	53,0	0,002
2395,0	Cm	ILC	0,007	1,12						
2433,0	Cm	MLC	0,006	1,12						
2513,1	Cm	MLC	0,004	0,90						
2568,2	Cm	MLC	0,009	1,32	18,6	0,002	10,0	8,6	81,4	0,002
2636,0	Cb	MLC	0,015	1,28	56,8	0,009	21,0	35,8	43,2	0,007
2762,0	Cb	MLC	0,008	1,57						
2840,0	Cb	MLC	0,010	1,03	37,4	0,003	12,0	25,4	62,6	0,003
2995,0	Cb	ILC	0,007	1,37						
3032,0	Cb	MLC	0,012	0,68						
3261,0	Cb	ILC	0,013	1,37	37,5	0,011	12,4	25,1	62,5	0,008
3312,0	Cs	MLC	0,017	1,64						
3355,0	Cs	ILC	0,035	2,92	18,4	0,006	11,8	6,6	81,6	0,002
3397,4	Cs	ILC	0,017	0,69						
3447,0	Cs	ILC	0,016	1,05						
3470,0	Cv	WAP	0,020	1,14						
3482,4	Cv	ILC	0,220	5,29	73,8	0,081	29,5	44,3	26,2	0,015
3499,5	Cv	MLC	0,011	2,18	27,7	0,005	6,1	21,6	72,3	0,002
3514,4	D ₃	WAP	0,005	0,16						
3591,5	D ₃	WAP	0,007	0,30						
3665,5	D ₃	MRL	0,014	0,99	51,0	0,009	37,7	13,3	49,0	0,009
3721,9	D ₃	WAP	0,005	0,19						
3789,7	D ₃	WAP	0,009	0,15	38,4	0,005	28,8	9,6	61,6	0,033
3950,0	D ₃	DOL	0,003	0,14						
4430,0	D ₁	ILC	0,003	0,13						
4617,0	D ₁	ILC	0,002	0,16						
5004,0	S	ILC	0,002	0,11						
5057,5	S	ILC	0,020	0,11	73,5	0,015	63,9	9,6	26,5	0,136

K₁ – kreda dolna, J₃ – jura górna, T₃ – trias górny, P/T – pogranicze permu i triasu, Pz – perm, cechsztyń, Cm – karbon, moskow, Cb – karbon, baszkir, Cs – karbon, serpuchow, Cv – karbon, wizen, D₃ – dewon górny, D₁ – dewon dolny, S – sylur; ZLP – zlepieniec, PSC – piaskowiec, MLC – mułowiec, ILC – ilowiec, ŁPK – łupek, WAP – wapień, DOL – dolomit, MRL – margiel; Zawartość bituminów [%] – zawartość bituminów wydzielonych z próbki skały podana w % wagowych; zawartość całkowitego Corg [%] – zawartość całkowitego węgla organicznego oznaczonego w próbce skalnej podana w % wagowych; węglowodory w bituminach [%] – udział procentowy węglowodorów w całej masie bituminów wydzielonych z próbki skalnej; węglowodory w skale [%] – udział procentowy węglowodorów w przeliczeniu na masę skały wg Gondek (1980); węglowodory nasycone w bituminach [%] – udział procentowy węglowodorów nasyconych w bituminach wydzielonych z próbki skalnej; węglowodory aromatyczne w bituminach [%] – udział procentowy węglowodorów aromatycznych w bituminach wydzielonych z próbki skalnej; żywice i asfaltenu w bituminach [%] – udział procentowy żywic i asfaltenu w bituminach wydzielonych z próbki skalnej; współczynnik migracji – stosunek zawartości węglowodorów wysycających w skale do zawartości węgla organicznego w badanej skale (Gondek, 1980)

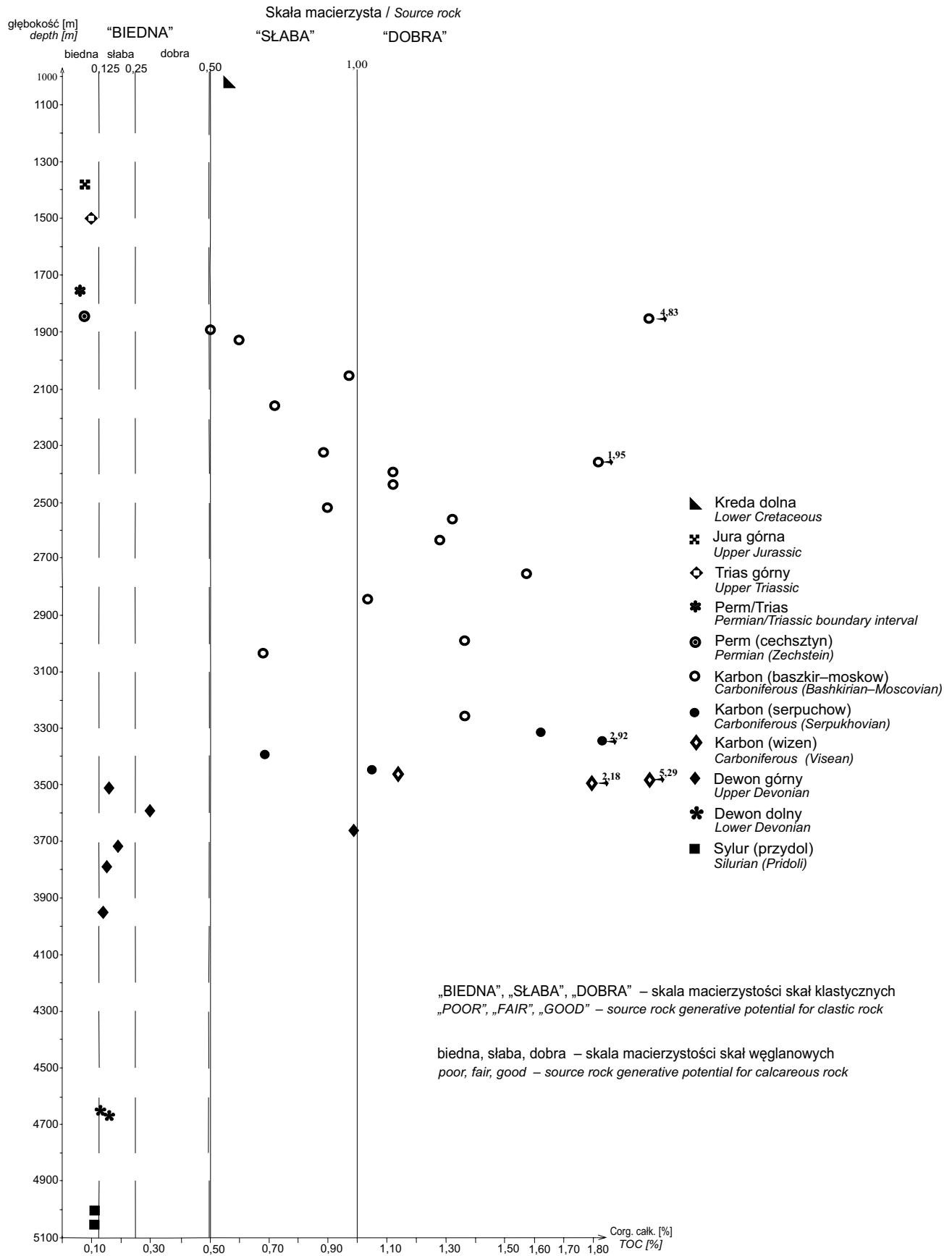


Fig. 38. Zawartość procentowa węgla organicznego w utworach paleozoiku i mezozoiku w zależności od głębokości; ocena macierzystości skał wg Petersa (1986)

TOC (%) content in the Paleozoic and the Mesozoic sediments versus depth; assessment of quality source rocks after Peters (1986)

migracji wynosi w tych utworach 0,136 (tab. 28). Gondek (1980), w pracy dotyczącej badań składników labilnych pochodzących z materii organicznej rozproszonej w skałach z Niżu Polskiego, przedstawiła zależność pomiędzy wysyceniem skał węglowodorami, a zawartością węgla organicznego, występującego w tych skałach, określającą współczynnik migracji bituminów. Epigenetyczny charakter bituminów potwierdza również duży udział węglowodórów nasyconych w stosunku do węglowodórów aromatycznych w całej masie węglowodórów (fig. 39). Ilość żywicy i asfaltenów jest mała (tab. 28, fig. 39).

Utwory dewonu dolnego zawierają małą ilość węgla organicznego (0,13–0,16%; tab. 28, fig. 38). Ilość wydzielonych bituminów z tych utworów jest bardzo mała.

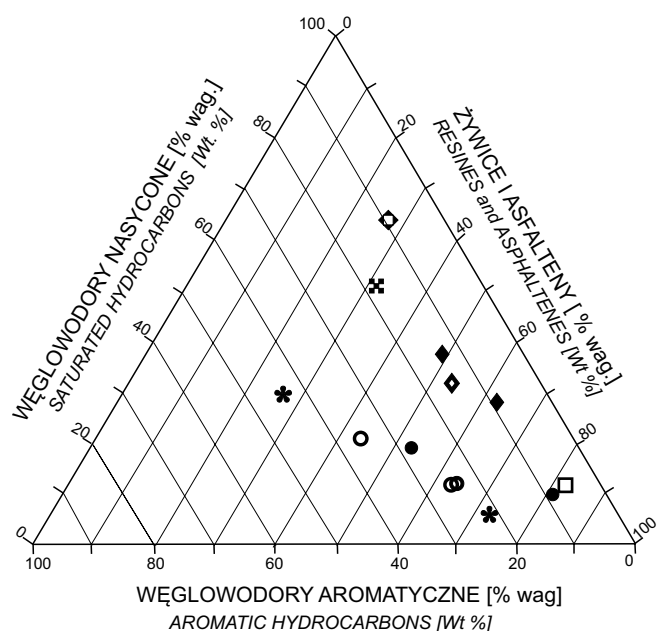
W utworach dewonu górnego ilość węgla organicznego jest mała – średnio 0,32%, niższa w spągu i stropie osadów, a wyższa w ich centralnej partii w marglach (tab. 28, fig. 38). Skały węglanowe o takiej zawartości węgla organicznego, zgodnie z kryteriami Espitalié i in., (1977) i Petersa (1986), badaczy zajmujących się problemami ropo- i gazotwórczości, można zakwalifikować jako „słabe”, a w centrum jako „dobre” skały macierzyste do generowania węglowodórów (fig. 38). Ilość bituminów jest mała (tab. 28). W wydzielonych bituminach udział węglowodórów jest zróżnicowany i wynosi od 38,4 do 51,0%. W składzie węglowodórów przeważają węglowodory nasycone nad węglowodorami aromatycznymi (fig. 39). Wyliczona wartość współczynnika migracji wskazuje, że te bituminy są syngenetyczne z osadem (Gondek, 1980).

W utworach wizenu zawartość węgla organicznego jest wysoka, zwłaszcza w centralnej części kompleksu skalnego (5,29%; tab. 28, fig. 38). Można uznać te utwory za „dobre” i „bardzo dobre” skały macierzyste do generowania węglowodórów. Zawartość bituminów w tych utworach jest niska w spągu i stropie, a duża w części środkowej, co jest związane z dużą ilością węgla organicznego (tab. 28). W bituminach występuje zróżnicowany udział węglowodórów – mały w utworach w spągu omawianego interwału i duży w jego centralnej części, co koresponduje z podwyższoną ilością bituminów. Uwzględniając podwyższoną zawartość węgla organicznego występującego w tych skałach, a także dużą ilość bituminów z nim związaną, należy przypuszczać, że obecna w badanym osadzie wysoko przeobrażona materia organiczna jest typu syngenetycznego. W węglowodorach przeważa frakcja związków aromatycznych nad nasyconymi (fig. 39).

Zawartość węgla organicznego w utworach serpuchowu jest wysoka – może osiągać 2,92% (tab. 28, fig. 38). Ilość C_{org} w tych utworach pozwala określić je jako „dobre” i „bardzo dobre” skały macierzyste do generowania węglowodórów (fig. 38). Zawartość bituminów w tych utworach jest niewielka. Jedynie w centralnej ich partii występuje podwyższona ilość bituminów związana z wysoką zawartością węgla organicznego (tab. 28). Udział węglowodórów w bituminach jest zróżnicowany. Charakterystyczny jest niewielki udział węglowodórów w bituminach przy równoczesnej podwyższonej ilości bituminów. W tym przypadku w węglowodorach dominuje frakcja nasycona nad aroma-

tyczną. Natomiast w górnej partii omawianych utworów ilość węglowodórów w bituminach jest wyższa, a w węglowodorach dominują węglowodory aromatyczne nad nasyconymi (tab. 28, fig. 39).

Klastyczne baszkiru–moskoku zawierają dużą ilość węgla organicznego, ale jest ona zróżnicowana. Średnia zawartość C_{org} wynosi 1,3%, a w górnych partiach kompleksu waha się od 0,50% do 4,83% (tab. 28, fig. 38). Utwory baszkiru–moskoku są skałami „słabymi” i „dobrymi”, a także punktowo „bardzo dobrymi” do generowania węglowodórów. Ilość bituminów jest mała od 0,002% do 0,015% (tab. 28). W bituminach oznaczono zróżnicowany udział węglowodórów od 18,6% do 56,8% (tab. 28). Udział asfaltenów i żywicy jest także zróżnicowany (tab. 28). W węglowodorach różny jest też stosunek frakcji węglowodórów nasyconych do aromatycznych (tab. 28, fig. 39). Bituminy są syngenetyczne z osadem, co wskazuje wartość współczynnika migracji (tab. 28).



Stratygrafia	Stratigraphy
✖ Trias górny	Upper Triassic
◆ Perm, cechsztyń	Permian, Zechstein
● Karbon, moskow	Carboniferous, Moscovian
○ Karbon, baszkir	Carboniferous, Bashkirian
□ Karbon, serpuchow	Carboniferous, Serpukhovian
✱ Karbon, wizen	Carboniferous, Visean
◆ Devon górny	Upper Devonian
◇ Sylur, przydol	Silurian, Pridoli

Fig. 39. Diagram trójkątny składu grupowego bituminów z utworów paleozoiku i mezozoiku w otworze Maciejowice IG 1

Triangular diagram showing proportions of the fractions of saturated hydrocarbons, aromatic hydrocarbons and asphaltenes or resins in the bitumens extracted from the Paleozoic and the Mesozoic sediments in the Maciejowice IG 1 borehole

W słabo przebadanych utworach cechsztynu zawartość węgla organicznego jest śladowa, mała jest również ilość bituminów (tab. 28, fig. 38). Udział węglowodorów w bituminach jest duży, a w ich składzie zaznacza się przewaga węglowodorów nasyconych nad węglowodorami aromatycznymi (tab. 28, fig. 39). Uwzględniając wartość współczynnika migracji można uznać, że bituminy w utworach cechsztynu są epigenetyczne z osadem.

Utwory triasu górnego zawierają bardzo małą ilość węgla organicznego (0,1%), a także małą ilość bituminów, cha-

rakteryzujących się dużym udziałem węglowodorów. W węglowodorach dominują węglowodory nasycone nad aromatycznymi. Wartość współczynnika migracji tych bituminów wskazuje, że są one epigenetyczne z osadem (tab. 28).

Słabo przebadane utwory jury górnej zawierają śladową ilość węgla organicznego (0,08%; tab. 28, fig. 38).

W marglach kredy dolnej zawartość węgla organicznego wynosi 0,56%, co pozwala określić te utwory jako „słabe” skały macierzyste do generowania węglowodorów. Ilość bituminów jest mała (tab. 28).

ŚRODOWISKO DEPOZYCJI, TYP GENETYCZNY I STOPIEŃ DOJRZAŁOŚCI MATERII ORGANICZNEJ

W utworach syluru materia organiczna jest typu sapropelowego. W skład n-alkanów wchodzi głównie związki o krótkich łańcuchach węglowych z maksimum zawartości związku n-C₁₉. Cząsteczki o długich łańcuchach węglowych, zawierających więcej niż 21 węgli w łańcuchu, pojawiają się w tej substancji w ilości śladowej. Stosunek węglowodorów izoprenoidowych iC₁₉ przystanu do iC₂₀ fitanu wskazuje, że w basenie sedymentacyjnym panowały utleniające warunki (Pr/Ph – 1,24; Didyk i in., 1978). Natomiast stosunek ilości izoprenoidu iC₁₉ do n-alkanu C₁₇ określa, że sedymentacja miała miejsce w basenie otwartym. Wartość wskaźnika CPI_{Tot} wynosi 1,01 co wskazuje, że materia organiczna jest przeobrażona (tab. 29, fig. 40A). Współczynnik CPI (ang. *Carbon Preference Index*), czyli wskaźnik preferencji współwystępujących n-alkanów, jest wykorzystywany do wstępnego określenia typu genetycznego oraz stopnia przeobrażenia materii organicznej (Kotarba i in., 1994). Dystrybucja n-alkanów wykazała, że materia orga-

niczna występująca w niższych partiach utworów dewonu górnego zawiera znaczną ilość związków C₁₇ i C₁₉ oraz dużo związków o parzystej liczbie węgli zawierających 18 i 20 węgli w łańcuchu, co sugeruje, że materiałem wyjściowym były algi i bakterie (fig. 40B; Maliński, Witkowski, 1988). Występowanie n-alkanu C₁₇ w maksymalnej ilości w ogólnej masie związków sugeruje, że stopień dojrzałości tych związków jest stosunkowo wysoki. Wartość wskaźnika CPI_{Tot}, wynosząca około jedności, pozwala stwierdzić, że materia organiczna obecna w niższej części utworów dewonu górnego jest dobrze przeobrażona. W wyższych partiach tych utworów dystrybucja n-alkanów wskazuje, że w materii organicznej dominuje związek C₁₇, reprezentujący dobrze przeobrażoną materię, pochodzącą z rozkładu alg (fig. 40C; Tissot, Welte, 1978).

W całym profilu utworów dewonu górnego występują, w małej ilości, związki zawierające 25, 27 lub 29 węgli w łańcuchu, związane z materią organiczną typu humusowego.

Tabela 29

Wskaźniki geochemiczne dla bituminów z utworów paleozoiku i mezozoiku z otworu Maciejowice IG 1

Geochemical data for the bitumens in the Paleozoic and the Mesozoic sediments from Maciejowice IG 1 borehole

Głębokość Depth [m]	Stratygrafia Stratigraphy	Litologia Lithology	Pr/Ph	Pr/n-C ₁₇	CPI _{Tot}	CPI ₁₇₋₂₃	CPI ₂₅₋₃₁	n-Cmax
5057,3	S	ILC	1,24	0,83	1,01	1,04	0,89	C ₁₉ , C ₁₈
3789,7	D ₃	WAP	1,37	0,40	1,03	1,05	0,98	C ₁₇ , C ₁₉ , C ₁₈
3665,5	D ₃	MRL	1,49	0,34	1,30	1,35	1,14	C ₁₇ , C ₁₉ , C ₁₈
3499,5	Cv	MLC	0,58	0,60	1,04	1,01	1,13	C ₂₃ , C ₂₂ , C ₂₅
3261,0	Cb	ILC	3,31	1,42	1,05	1,01	1,19	C ₁₉ , C ₂₀ , C ₁₈ , C ₂₁
2840,0	Cb	MLC	2,35	2,08	1,05	0,97	1,28	C ₁₈ , C ₂₀ , C ₂₁
2568,2	Cm	MLC	1,78	1,12	1,10	1,05	1,30	C ₁₇ , C ₁₈
2363,5	Cm	MLC	0,70	1,26	0,95	0,83	1,47	C ₁₉ , C ₁₈ , C ₂₀
1500,0	T ₃	ZLP	1,96	1,15	0,91	0,90	1,33	C ₁₇ , C ₁₈

S – sylur, D₃ – dewon górny, Cv – karbon, wizen, Cb – karbon, baszkir, Cm – karbon, moskow, T₃ – trias górny; MLC – mułowiec, ILC – ilowiec, MRL – margiel, WAP – wapień, ZLP – zlepieniec; Pr/Ph – stosunek przystanu (Pr) do fitanu (Ph); CPI – wartość współczynnika CPI (Carbon Preference Index) dla n-alkanów od 17 do 31 węgli

$$CPI = \frac{(C_{17} + C_{19} + \dots + C_{27} + C_{29}) + (C_{19} + C_{21} + \dots + C_{29} + C_{31})}{2(C_{18} + C_{20} + \dots + C_{28} + C_{30})}$$

n-Cmax – n-alkan z maksymalną zawartością

S – Silurian, D₃ – Upper Devonian, Cv – Carboniferous, Visean, Cb – Carboniferous, Bashkirian, Cm – Carboniferous, Moscovian, T₃ – Upper Triassic; MLC – mudstone, ILC – claystone, MRL – marl, WAP – limestone, ZLP – conglomerate; Pr/Ph – pristane (Pr) to phytane (Ph) ratio; CPI – the value of coefficient CPI (Carbon Preference Index) for the n-alkanes C₁₇-C₃₁, n-Cmax – n-alkane maximum contents

Stosunek węglowodorów izoprenoidowych wynosi 1,37 i 1,49 (tab. 29), co sugeruje, że utwory osadzały się w basenie o silnie utleniających warunkach środowiska.

W mułowcach wizenu materia organiczna wykazuje mieszany charakter morski i lądowy. Dystrybucja n-alkanów przedstawia współwystępowanie dobrze przeobrażonej materii typu humusowego (n-alkan C_{25}) i słabo przeobrażonej materii typu sapropelowego z maksymalną zawartością n-alkanu C_{23} i n-alkanu C_{24} (fig. 41A). Ilościowy stosunek węglowodorów izoprenoidowych Pr/Ph = 0,58 i stosunek Pr/n- C_{17} = 0,60 wskazują, że osadzanie zachodziło w środowisku redukcyjnym, w warunkach otwartego morza (tab. 29). Można więc założyć, że mogła tu mieć miejsce redepozycja bardziej przeobrażonej lądowej materii organicznej do zbiornika sedymentacyjnego (fig. 41A).

Analizując wartość współczynnika CPI_{Tot} n-alkanów z utworów wizenu można stwierdzić, że materia organiczna jest przeobrażona (tab. 29). W utworach niższego baszkirowy w tym otworze występują oba typy materii organicznej, ale dominujący jest słabo przeobrażony sapropel. W dystrybucji n-alkanów maksymalną zawartość osiąga n-alkan C_{19} , przy wyraźnym udziale n-alkanu C_{25} , pochodzącego z rozkładu związków budujących tkanki roślin lądowych, silnie przeobrażone, co sugeruje, że materia terygeniczna jest redeponowana. Pozostałe cząstki o długich łańcuchach węglowych występują w niewielkich, a nawet śladowych ilościach (fig. 41B). Stosunek ilościowy węglowodorów izoprenoidowych (Pr/Ph = 3,31) wskazuje, że osady te tworzyły się w środowisku utleniającym. Wartość wskaźnika wyliczonego ze stosunku węglowodoru izoprenoidowego i- C_{19} do n-alkanu C_{17} wynosi 1,42, co sugeruje sedymentację w zbiorniku zamkniętym (tab. 29).

Dystrybucja n-alkanów z materii organicznej z utworów wyższego baszkirowy–moskowskiego pokazuje zróżnicowanie w pionowym profilu tych utworów. W dolnych partiach kompleksu w materii organicznej współwystępują związki o krótszych łańcuchach węglowych jak i zawierające 25, a także 27 węgli w łańcuchu, pochodzące z rozpadu roślin wyższych. W całej masie związków w największej ilości występuje n-alkan C_{18} , pochodzący z rozkładu bakterii, ale w dużej ilości obecne są n-alkany C_{17} i C_{19} , a także n-alkan C_{23} (fig. 41C). Taki obraz dystrybucji n-alkanów sugeruje, że w materii organicznej mogą występować dwie generacje węglowodorów o różnym stopniu przeobrażenia. Stosunek węglowodorów izoprenoidowych Pr/Ph pozwala sądzić, że materia organiczna z tych utworów osadzała się w silnie utleniających warunkach (tab. 29). Wartość współczynnika CPI_{Tot} wskazuje, że materia organiczna w dolnych partiach utworów baszkirowy jest słabo przeobrażona (tab. 29). W centralnej partii utworów rozkład dystrybucji n-alkanów jest zbliżony do tego pochodzącego z utworów z dolnych partii, ale większy jest udział materii typu sapropelowego w stosunku do materii typu humusowego. W największej ilości występuje n-alkan C_{17} łączony z rozkładem alg (fig. 42A). Stosunek węglowodorów izoprenoidowych Pr/Ph pozwala sądzić, że materia organiczna z tych utworów osadzała się w środowisku o utleniających warunkach (tab. 29). Natomiast w górnej części utworów, w materii organicznej

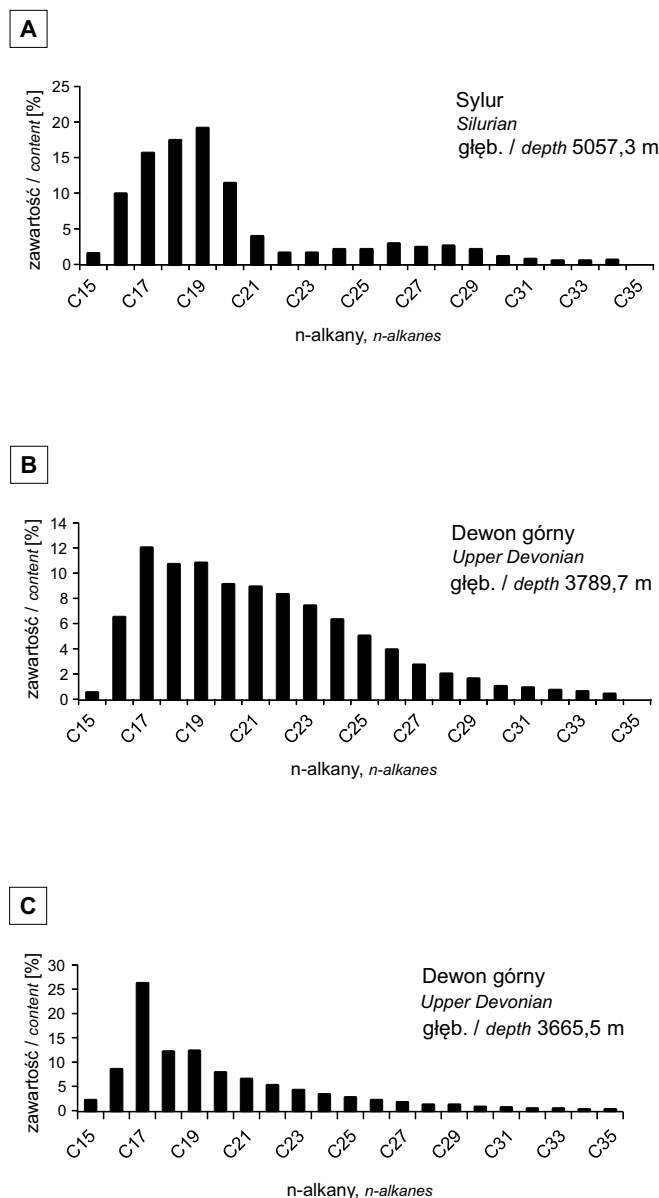


Fig. 40. Dystrybucja n-alkanów i węglowodorów izoprenoidowych w utworach syluru i dewonu w otworze Maciejowice IG 1

Distribution of n-alkanes and isoprenoides in the Silurian and Devonian rocks of the Maciejowice IG 1 borehole

zmniejsza się udział związków o długich łańcuchach, łączonych z rozpadem roślin wyższych, a zwiększa się znacznie obecność związków o krótszych łańcuchach z 18, 19, 20 węglami, pochodzącymi od alg i bakterii (fig. 42B). Stosunek węglowodorów izoprenoidowych Pr/Ph pozwala sądzić, że materia organiczna z tych utworów osadzała się w słabo redukcyjnych warunkach (tab. 29). Wartość współczynnika CPI_{Tot} , wynosząca poniżej jedności, nie pozwala na określenie stopnia przeobrażenia badanej materii, ze względu na duży udział związków o parzystej liczbie węgli w łańcuchu, pochodzących z rozkładu bakterii (tab. 29).

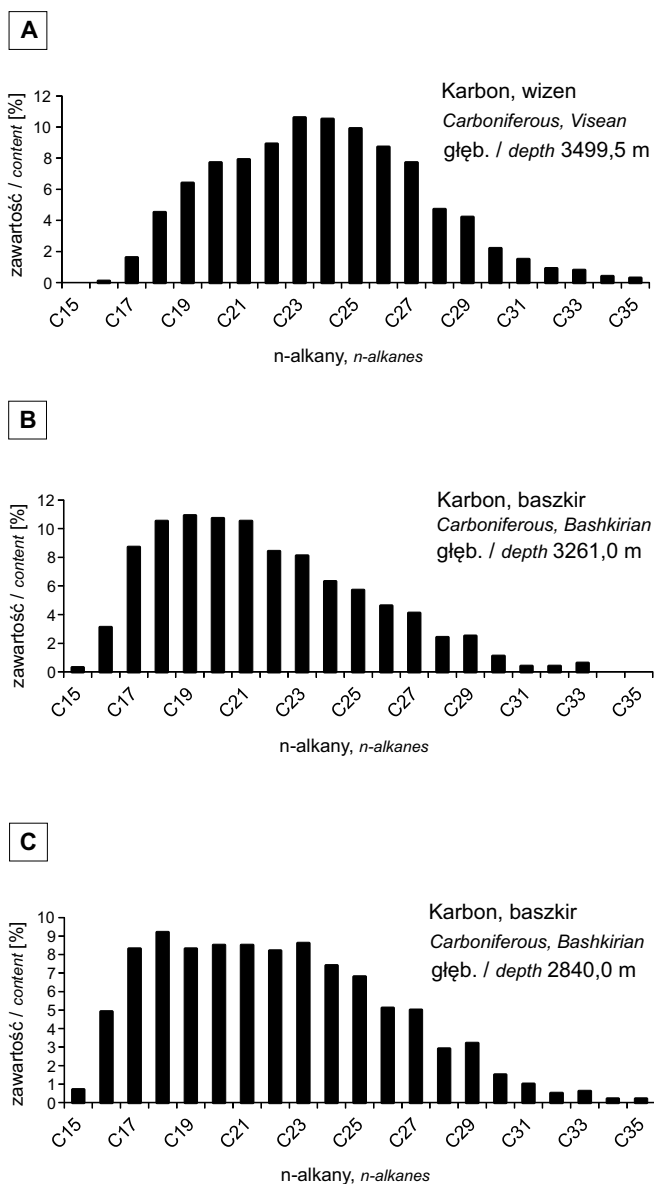


Fig. 41. Dystrybucja n-alkanów i węglowodorów izoprenoidowych w utworach karbonu w otworze Maciejowice IG 1

Distribution of n-alkanes and isoprenoids in the Carboniferous rocks of the Maciejowice IG 1 borehole

Dystrybucja n-alkanów z utworów triasu górnego wykazała, że w materii organicznej występują głównie związki o krótkich łańcuchach węglowych, z największymi zawartościami n-C₁₇ i n-C₁₈, czyli związki reprezentujące algi i bakterie (Maliński, Witkowski, 1988). Związki o długich łańcuchach węglowych są odnotowane w śladowych ilościach (fig. 42C). Stosunek ilościowy węglowodorów izoprenoidowych (Pr/Ph) pozwala sądzić, że materia organiczna osadzała się w środowisku utleniającym (tab. 29). Wartość stosunku pristan/n-C₁₇ wynosi 1,15 (tab. 29), co sugeruje, że materia organiczna sedymentowała w warunkach zbiornika zamkniętego. Wartość współczynnika CPI_{Tot}, wynosząca poniżej jedności, nie pozwala na określenie

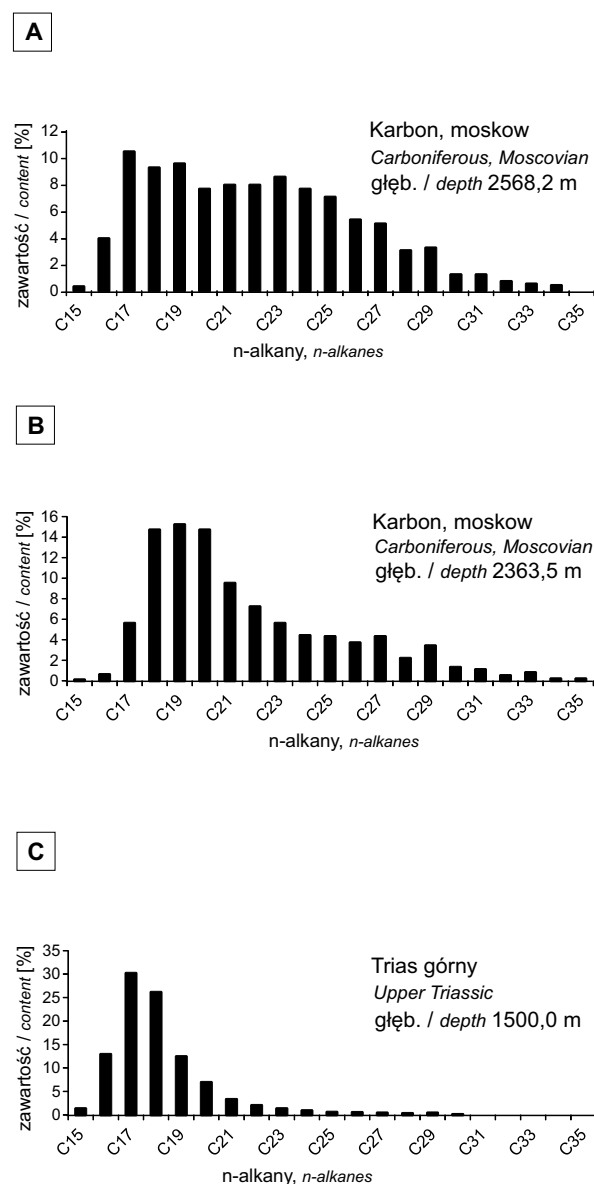


Fig. 42. Dystrybucja n-alkanów i węglowodorów izoprenoidowych w utworach karbonu i triasu w otworze Maciejowice IG 1

Distribution of n-alkanes and isoprenoids in the Carboniferous and Upper Triassic rocks of the Maciejowice IG 1 borehole

stopnia przeobrażenia badanej materii, ze względu na duży udział związków o parzystej liczbie węgla w łańcuchu, pochodzących z rozkładu bakterii.

Utwory syluru, pochodzące z otworu Maciejowice IG 1, zawierają w grupie terpanów głównie związki pentacykliczne, przy czym związki tricykliczne występują jedynie w ilości śladowej. Przeważającą ilość związków pentacyklicznych potwierdza duża ilość bakterii w składzie pierwotnej materii (tab. 30; Peters, Moldovan, 1993). W grupie hopanów stwierdzono, że C₃₀H – hopan dominuje nad C₂₉H – norhopanem, co sugeruje osadzanie się materii organicznej w facji skał klastycznych (Connan i in., 1986). Wartość wskaźnika wyliczanego ze stosunku trisnorhopanów

Ts/(Ts+Tm) dla materii organicznej występującej w tych utworach pozwala sądzić, że materia organiczna w nich występująca jest przeobrażona (tab. 30). Stopień dojrzałości materii organicznej określa także stosunek związków z grupy steranów. Sterany regularne są mniej odporną na zmiany termiczne grupą związków, natomiast diasterany są grupą odporniejszą na te zmiany. W związku z tą zależnością, w miarę następowania przemian pod wpływem działań termicznych, rośnie grupa diasteranów, a zmniejsza się grupa steranów regularnych. Jednocześnie diasterany są związkami, które charakteryzują środowisko sedymentacji, w jakim osadzała się wyjściowa materia organiczna, gdyż minerały ilaste są katalizatorem dla tworzenia się diasteranów (van Kaam-Peters i in., 1998). W badanej próbce z syluru, steran C₂₇ występuje w znacznej ilości, ale w większej ilości oznaczono steran C₂₉. Mimo że steran C₂₉ pochodzi głównie od roślin wyższych, jest często spotykany także w znacznej ilości w składnikach labilnych z utworów starszego paleozoiku. Obecność steranu C₂₉ w osadach starszego paleozoiku jest łączona z rozkładem alg (Grantham, 1986).

Dystrybucja terpanów w utworach franu (dewon górny) wykazuje współwystępowanie związków tricyklicznych i pentacyklicznych, z dominującą ilością tych ostatnich, co

oznacza, że materia organiczna pochodzi z rozkładu bakterii i organizmów na wyższym stopniu rozwoju (organizmów eukariotycznych; tab. 30). Zależność składu grupy terpanów od typu organizmów budujących wyjściową materię organiczną przedstawili w swoich pracach badawczych Peters i Moldowan (1993). Trisnorhopan Tm (17α21β – H) występuje w większej ilości niż trisnorhopan II Ts (18α 21β – H), co sugeruje niski stopień przeobrażenia materii organicznej. Potwierdza to także obecność moretanu w badanych związkach. Moldowan i in. (1985) wykazali, że obecność moretanu w grupie terpanów świadczy o słabym przeobrażeniu, gdyż jest to związek mało odporny na działania termiczne.

Obraz chromatograficzny steranów wydzielonych z materii organicznej moskoku wykazuje, że dominującym składnikiem są stigmastany C₂₉S, przy mniejszym udziale cholestanów C₂₇S. Przedstawione dane analityczne świadczą o obecności materii humusowej w składzie analizowanej materii organicznej. Niski udział diasteranów w stosunku do ilości steranów świadczy o niskim stopniu przeobrażenia badanej materii organicznej. Utwory moskoku zawierają w grupie triterpanów w dużej ilości związki pentacykliczne, które są łączone z materią organiczną pochodzącą z rozpadu bakterii. Dominujący, w omawianych utworach,

Tabela 30

Biomarkery grupy triterpanów (m/z 191) oraz steranów (m/z 217) z materii organicznej w utworach paleozoiku w otworze wiertniczym Maciejowice IG 1

Biomarkers triterpanes group (m/z 191) and steranes (m/z 217) from organic matter in the Paleozoic sediments in Maciejowice IG 1 borehole

Głębokość Depth [m]	Stratygrafia Stratigraphy	Litologia Lithology	T _s /(T _s +T _m)	T/(T+P)	C ₃₀ H/(C ₃₀ H+C ₂₉ H)	C ₃₀ M/(C ₃₀ H+C ₃₀ M)	C ₃₁ H22S/(22S+22R)	C ₂₄ TET/C ₂₃ T	C ₃₁ H/(C ₃₁ H+C ₃₁ H)	Disterany/Sterany reg C ₂₇ D/C ₂₇ S+ C ₂₇ D	C ₂₇ /C ₂₈ /C ₂₉ Sterany [%]
5057,5	S	ILC	0,53	0,08	0,52	-	0,59	1,93	-	0,43	43,6/10,8/45,6
3789,7	D ₃	WAP	0,34	0,13	0,60	0,09	0,60	0,94	0,84	0,38	47,7/12,8/39,5
2568,2	Cm	MLC	0,74	0,13	0,58	0,22	0,44	0,50	-	0,44	35,3/15,3/49,4

S – sylur, D₃ – dewon górny, Cm – karbon, moskoku; MLC – mułowiec, ILC – ilowiec, WAP – wapień; Ts/(Ts+Tm) – stosunek zawartości związku 22, 29, 30-trisnorhopanu-II (Ts) do sumy zawartości związków 22, 29, 30-trisnorhopanu-II (Ts) i 22, 29, 30-trisnorhopanu (Tm); T/(T+P) – stosunek zawartości związków tricyklicznych do sumy zawartości związków tricyklicznych i związków pentacyklicznych; C₃₀H/(C₃₀H+C₂₉H) – stosunek zawartości związku 17α21β(H)=hopanu do sumy zawartości hopanu i zawartości związku 17α21β(H)30-norhopanu; C₃₀M/(C₃₀H+C₃₀M) – stosunek zawartości związku 17β21α(H)-moretanu do sumy zawartości związku 17α21β(H) hopanu i zawartości związku 17β21α(H)-moretanu; C₃₁H22S/(22S+22R) – stosunek zawartości związku 17α21β(H) homohopanu – epimeru 22S do sumy zawartości 17α21β(H) homohopanu – epimerów 22S i 22R; C₂₄TET/C₂₃T – stosunek zawartości związku C₂₄ tetracyklicznego do zawartości związku C₂₃ tricyklicznego; C₃₁/(C₃₁+C₃₅) – stosunek zawartości związku 17α21β(H) homohopanu (epimer 22S+22R) do sumy zawartości homohopanów C₃₁ i C₃₅; Sterany/Hopany – stosunek zawartości związków z grupy hopanów do zawartości związków z grupy steranów regularnych; Diasterany/Sterany reg. – stosunek zawartości diasteranów związków C₂₇ do zawartości związków z grupy steranów regularnych C₂₇; C₂₇/C₂₈/C₂₉ S% – procentowy udział poszczególnych związków z grupy steranów

S – Silurian, D₃ – Upper Devonian, Cm – Carboniferous, Moscovian; MLC – mudstone, ILC – claystone, WAP – limestone; Ts/(Ts+Tm) – ratio of the abundance of 22, 29, 30-Trisnorhopane-II(Ts) to sum of the abundance of 22, 29, 30-Trisnorhopane-II(Ts) and 22, 29, 30-Trisnorhopane (Tm); T/(T+P) – the ratio of abundance of Tricyclic terpanes to sum of the abundance of Tricyclic terpanes and Pentacyclic terpanes; C₃₀H/(C₃₀H+C₂₉H) – ratio of the abundance of 17α21β(H)hopane to sum of abundance of 17α21β(H)hopane and 17α21β(H)30 norhopane; C₃₀M/(C₃₀H+C₃₀M) – the ratio of the abundance of 17β21α(H) moretane to sum of the abundance of 17β21α(H) hopane and 17β21α(H) moretane; C₃₁H22S/(22S+22R) – the ratio of the abundance of 17α21β(H) homohopane (epimer 22S) to sum of the abundance of 17α21β(H) homohopane (epimer 22S+22R); C₂₄TET/C₂₃T – the ratio of the abundance of Tetracyclic (C₂₄) to Tricyclic (C₂₃); C₃₁/(C₃₁+C₃₅) – the ratio of the abundance of 17α21β(H) homohopane (epimer 22S+22R) to sum of the abundance of homohopane C₃₁ and C₃₅; Sterany/Hopany – the regular steranes/ hopanes ratio; Diasterany/Sterany reg. – the diasteranes/ regular steranes ratio; C₂₇/C₂₈/C₂₉ S % – the abundance of regular steranes

jest związek hopan $C_{30}H$, nad związkiem $C_{29}H$ (17a21b – norhopan), co wskazuje na sedimentację wśród osadów klastycznych. Zaobserwowane zmniejszanie zawartości związków z szeregu homohopanów C_{31} – C_{35} potwierdza, że

materia organiczna osadzała się w facji skał klastycznych (Peters, Moldowan, 1993). Wartość wskaźnika $Ts/(Ts+Tm)$ jest wysoka, co sugeruje niski stopień przeobrażenia materii organicznej (tab. 30).

PODSUMOWANIE

Badania geochemiczne materii organicznej w profilu otworu Maciejowice IG 1 wykazały, że za „dobre” skały macierzyste do generowania węglowodorów mogą być uważane utwory wizenu oraz pensylwanu. W pozostałych badanych utworach syluru, dewonu i mezozoiku zawartość węgla organicznego wskazuje, że są to „biedne” lub „słabe” skały macierzyste. Charakteryzują się one małą albo bardzo małą zawartością składników labilnych. Podwyższona ilość bituminów występuje w utworach karbonu, w których została oznaczona wyższa zawartość węgla organicznego, co wskazuje że są to związki syngenetyczne z osadem. W utworach syluru i permu, a także w pia-

skowcach triasu górnego bituminy mają charakter epigenetyczny z osadem.

Materiałem wyjściowym do tworzenia się materii organicznej były algi i w dużym stopniu bakterie. W utworach dewonu górnego i karbonu w zróżnicowanych ilościach obserwuje się udział materii typu humusowego. Stopień przeobrażenia materii organicznej jest trudny do określenia ze względu na duży udział bakterii w wyjściowej materii organicznej. Badania biomarkerów z grupy steraanów i terpanów pozwalają stwierdzić, że materia organiczna w utworach syluru jest dobrze przeobrażona, natomiast w utworach dewonu i karbonu stopień jej przeobrażenia nie jest wysoki.

Barbara MASSALSKA

BADANIA GEOCHEMICZNE MATERII ORGANICZNEJ METODĄ ROCK-EVAL

WSTĘP

Otwór Maciejowice IG 1 jest zlokalizowany na obszarze rowu lubelskiego, z którym jest związane występowanie systemu naftowego młodszego paleozoiku. W tym rejonie stwierdzono obecność potencjalnych skał macierzystych w obrębie utworów dewonu i karbonu (Kotarba i in., 2005). Charakterystyka geochemiczna materii organicznej w otworze Maciejowice IG 1 opiera się na badaniach pirolitycznych aparatem Rock-Eval, których rezultaty zamieszczono w dokumentacji wynikowej otworu (Żelichowski i in., 1977). W źródłowym opracowaniu archiwalnym zamieszczono wyniki badań 71 próbek pochodzących głównie ze skał karbonu i dewonu, a także z pojedynczych horyzontów jury, triasu, permu i syluru. Zakresy wartości oraz mediany parametrów Rock-Eval dla poszczególnych jednostek litostratygraficznych wymienionych systemów przedstawiono w tabeli 31. Figura 43 zawiera wartości wybranych parametrów Rock-Eval zestawione w formie profilu.

Analiza pirolityczna Rock-Eval jest powszechną metodą wstępnego badania potencjalnych skał macierzystych dla węglowodorów. Zarys metodyki badań przedstawiono w pracach polskich i zagranicznych autorów (np. Kotarba, Szafran, 1985; Behar i in., 2001; McCarthy i in., 2011). Ba-

danie aparatem Rock-Eval dostarcza szeregu parametrów i wskaźników geochemicznych, które są stosowane do interpretacji własności skał macierzystych, takich jak: typ kerogenu, potencjał węglowodorowy czy dojrzałość termiczna materii organicznej. Interpretacji wyników badań geochemicznych materii organicznej dokonano na podstawie następujących parametrów i wskaźników:

- TOC – całkowita zawartość węgla organicznego (% wag),
- S1 – zawartość wolnych węglowodorów (mg HC/g skały),
- S2 – ilość węglowodorów generowanych w trakcie pirolizy/potencjał generacyjny skały (mg HC/g skały),
- S3 – ilość CO_2 związanego z materią organiczną (mg CO_2 /g skały),
- HI – wskaźnik wodorowy (mg HC/g TOC),
- OI – wskaźnik tlenowy (mg CO_2 /g TOC),
- T_{max} – temperatura maksymalnego generowania węglowodorów ($^{\circ}C$),
- PI – wskaźnik produktywności,
- OSI – wskaźnik nasycenia ropą (mg HC/g TOC),
- S2/S3 – stosunek ilości węglowodorów generowanych w trakcie pirolizy do ilości CO_2 związanego z materią organiczną.

OPRACOWANIE WYNIKÓW

Wyniki analizy Rock-Eval pozwoliły stwierdzić, że większość przebadanych horyzontów posiada w swoim składzie znikome ilości węgla organicznego (TOC <0,2% wag.). Dotyczy to wszystkich próbek pochodzących z for-

macji bełżyckiej, formacji krańickiej (jura), warstw nidzickich, wapienia muszlowego (trias), pstrego piaskowca?/cechsztynu? (trias?/perm?), cechsztynu (perm), formacji modryńskiej, formacji zwolenńskiej, formacji czarnoleskiej,

Tabela 31

Wyniki analizy Rock-Eval w otworze Maciejowice IG 1

The results of Rock-Eval analysis in the Maciejowice IG 1 borehole

Stratygrafia / Stratigraphy	n	TOC	SI	S2	S3	HI	OI	T _{max}	PI	OSI	S2/S3
J											
fm głowaczowska Głowaczów Fm	1	0,56	0,10	0,61	0,48	108	85	433	0,14	18	1,3
fm belżycka / Belżyce Fm	1	0,14	0,09	0,14	0,32	100	228	434	0,39	64	0,4
fm kraśnicka / Kraśnik Fm	1	0,08	0,09	0,07	0,26	87	325	419	0,56	113	0,3
warstwy niżdżickie Nidzica Beds	1	0,10	0,05	0,05	0,64	50	640	428	0,50	50	0,1
wapień muszlowy Muschelkalk	1	0,05	0,05	0,06	0,24	120	480	410	0,45	100	0,3
pstry piaskowice? / cechsztyń? / Buntsandstein? / Zechstein?	1	0,06	0,12	0,09	0,45	150	750	301	0,57	200	0,2
P											
cechsztyń / Zechstein	1	0,08	0,07	0,05	0,59	62	737	-	0,58	88	0,1
fm Magnuszewa Magnuszew Fm	17	0,23-4,83 (0,74)	0,04-0,35 (0,1)	0,03-1,52 (0,37)	0,18-5,51 (1,05)	10-77 (36)	36-918 (106)	344-447 (436)	0,08-0,80 (0,21)	2-140 (14)	0,0-1,3 (0,3)
fm lubelska / Lublin Fm	5	0,20-1,57 (1,03)	0,01-0,10 (0,09)	0,03-1,52 (0,37)	0,14-1,66 (0,40)	25-80 (53)	16-161 (78)	435-442 (438)	0,09-0,17 (0,13)	5-11 (7)	0,4-2,3 (0,6)
fm Dębina / Dębin Fm	5	0,11-1,37 (0,40)	0,04-0,09 (0,06)	0,02-1,89 (0,41)	0,09-0,23 (0,17)	16-137 (90)	11-191 (84)	300-440 (434)	0,04-0,82 (0,19)	5-75 (21)	0,1-11,8 (4,3)
fm Terebina / Terebino Fm	4	0,69-2,92 (1,37)	0,14-0,71 (0,17)	0,75-3,81 (1,69)	0,13-0,81 (0,51)	108-164 (123)	18-77 (28)	435-466 (443)	0,8-0,16 (0,12)	11-24 (16)	1,5-7,2 (5,3)
fm Huczwy / Huczwa Fm	3	1,14-5,29 (2,18)	0,24-2,45 (0,31)	1,03-31,99 (1,21)	0,33-0,61 (0,40)	47-604 (106)	11-28 (18)	443-449 (444)	0,07-0,23 (0,17)	14-46 (21)	2,6-52,4 (3,7)
fm firlejska / Firlej Fm	2	0,16-1,23 (0,70)	0,06-0,29 (0,18)	0,19-0,69 (0,44)	0,20-0,49 (0,35)	56-118 (87)	39-125 (82)	439-446 (443)	0,24-0,30 (0,28)	24-38 (31)	1,0-1,4 (1,2)
„formacja” bychawska Bychawa formation	3	0,19-0,99 (0,30)	0,13-0,44 (0,18)	0,28-3,65 (0,56)	0,20-0,33 (0,24)	147-368 (186)	24-173 (66)	440-444 (443)	0,11-0,32 (0,24)	44-68 (60)	0,8-15,2 (2,8)
fm modryńska / Modryń Fm	7	0,02-0,15 (0,10)	0,04-0,15 (0,08)	0,04-0,26 (0,13)	0,04-0,28 (0,12)	83-200 (150)	26-250 (150)	433-446 (441)	0,33-0,50 (0,44)	58-200 (107)	0,5-6,5 (1,0)
fm zwolenńska / Zwolen Fm	5	0,02-0,06 (0,03)	0,04-0,08 (0,07)	0,00-0,14 (0,02)	0,00-0,11 (0,03)	33-233 (108)	0-183 (133)	359-420 (394)	0,33-1,00 (0,80)	117-350 (250)	0,0-1,3 (0,5)
fm czarnoleska Czarnolas Fm	2	0,04-0,06 (0,05)	0,05-0,10 (0,08)	0,02-0,08 (0,05)	0,03-0,06 (0,05)	33-200 (117)	50-150 (100)	408-415 (412)	0,56-0,71 (0,63)	83-250 (167)	0,7-1,3 (1,0)
fm sycyńska / Sycyna Fm	8	0,07-0,16 (0,11)	0,01-0,19 (0,08)	0,01-0,26 (0,07)	0,05-0,24 (0,15)	10-162 (78)	45-240 (152,5)	357-440 (421)	0,42-0,70 (0,50)	10-119 (95)	0,0-2,4 (0,4)
S											
nie wydzielone jedn. litostr. undefined lithostr. units	3	0,10-0,11 (0,11)	0,04-0,08 (0,06)	0,03-0,04 (0,03)	0,08-0,16 (0,10)	27-40 (27)	80-145 (90)	342-370 (357)	0,50-0,73 (0,67)	40-73 (55)	0,2-0,5 (0,3)

Objaśnienia: n – liczba przeanalizowanych próbek, TOC – całkowity węgiel organiczny (% wag.), SI – wolne węglowodory (mg HC/g skały), S2 – węglowodory generowane w trakcie pirolizy (mg HC/g skały), S3 – CO₂ związane z materią organiczną (mg CO₂/g skały), HI – wskaźnik wodnorodny (mg HC/g TOC), OI – wskaźnik tlenowy (mg CO₂/g TOC), T_{max} – temperatura maksymalnego generowania węglowodorów (°C), PI – wskaźnik produktywności, OSI – wskaźnik nasycenia ropą (mg HC/g TOC). W przypadku formacji, z których przebadano więcej niż jedną próbkę, dla poszczególnych parametrów geochemicznych podany został zakres wartości oraz w nawiasie zawarto medianę

Explanation: n – number of samples tested; TOC – total organic carbon (wt%), SI – free hydrocarbons (mg HC/g rock), S2 – hydrocarbons generated during pyrolysis (mg HC/g rock), HI – hydrogen index (mg HC/g TOC), OI – oxygen index (mg CO₂/g TOC), T_{max} – temperature of maximum hydrocarbon generation (°C), PI – production index, OSI – oil saturation index (mg HC/g TOC). In formations from which more than one sample was tested, the range of values of particular geochemical parameters is specified and the median value is given in brackets.

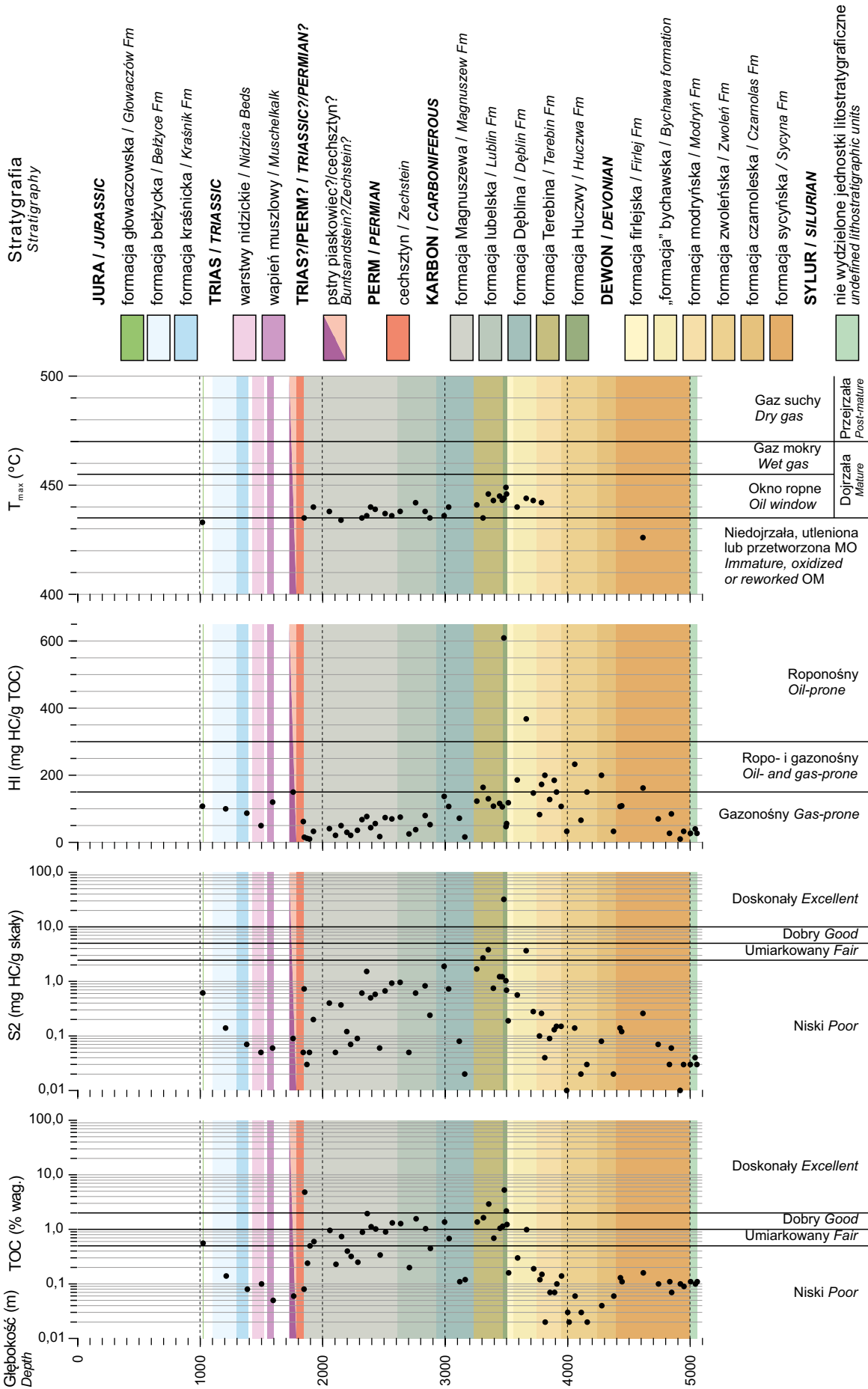


Fig. 43. Wybrane parametry Rock-Eval w odniesieniu do głębokości w profilu pionowym otworu Maciejowice IG 1

Selected Rock-Eval parameters plotted against depth on the vertical profile of the Maciejowice IG 1 borehole

formacji sycyńskiej (dewon) oraz sukcesji syluru. Skały te zawierają w swoim składzie kerogen typu IV (fig. 44A, B, 45A, B), który jest jałowy w kontekście generacji węglowodorów (fig. 44C, 46C). Niewielkie ilości wygenerowanych podczas pirolizy węglowodorów ($S_2 < 0,2$ mg HC/g skały) uniemożliwiają interpretację stopnia dojrzałości termicznej materii organicznej wymienionych skał na podstawie para-

metru T_{max} . Wyniki pomiarów refleksyjności witrnytu dla próbek pochodzących z utworów jury, triasu, permu i karbonu są dostępne w rozdziale Kleczyńskiego (ten tom). Z uwagi na niską jakość materii organicznej w większości przebadanych skał, szczegółowemu opracowaniu poddano wyłącznie wyniki analizy geochemicznej materii organicznej formacji, których mediana TOC przekracza 0,2% wag. skały.

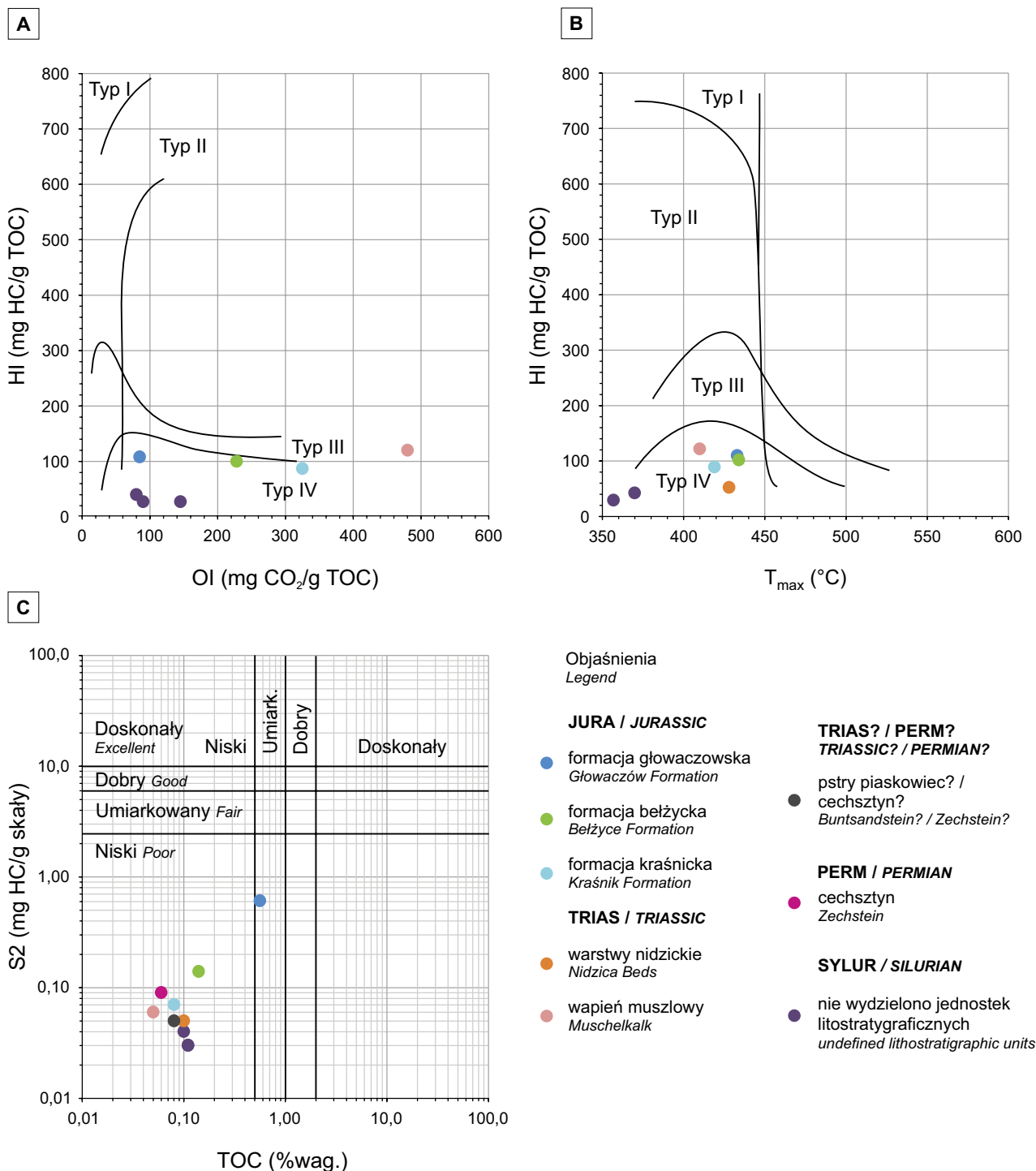


Fig. 44. Diagramy klasyfikacyjne parametrów (A) HI vs OI, (B) HI vs T_{max} , (C) S_2 vs TOC dla wyników analizy Rock-Eval próbek skał syluru, permu, triasu, jury i kredy

Classification diagrams of (A) HI vs OI, (B) HI vs T_{max} , (C) S_2 vs TOC for the Rock-Eval analysis results of Silurian, Permian, Triassic, Jurassic and Cretaceous rock samples

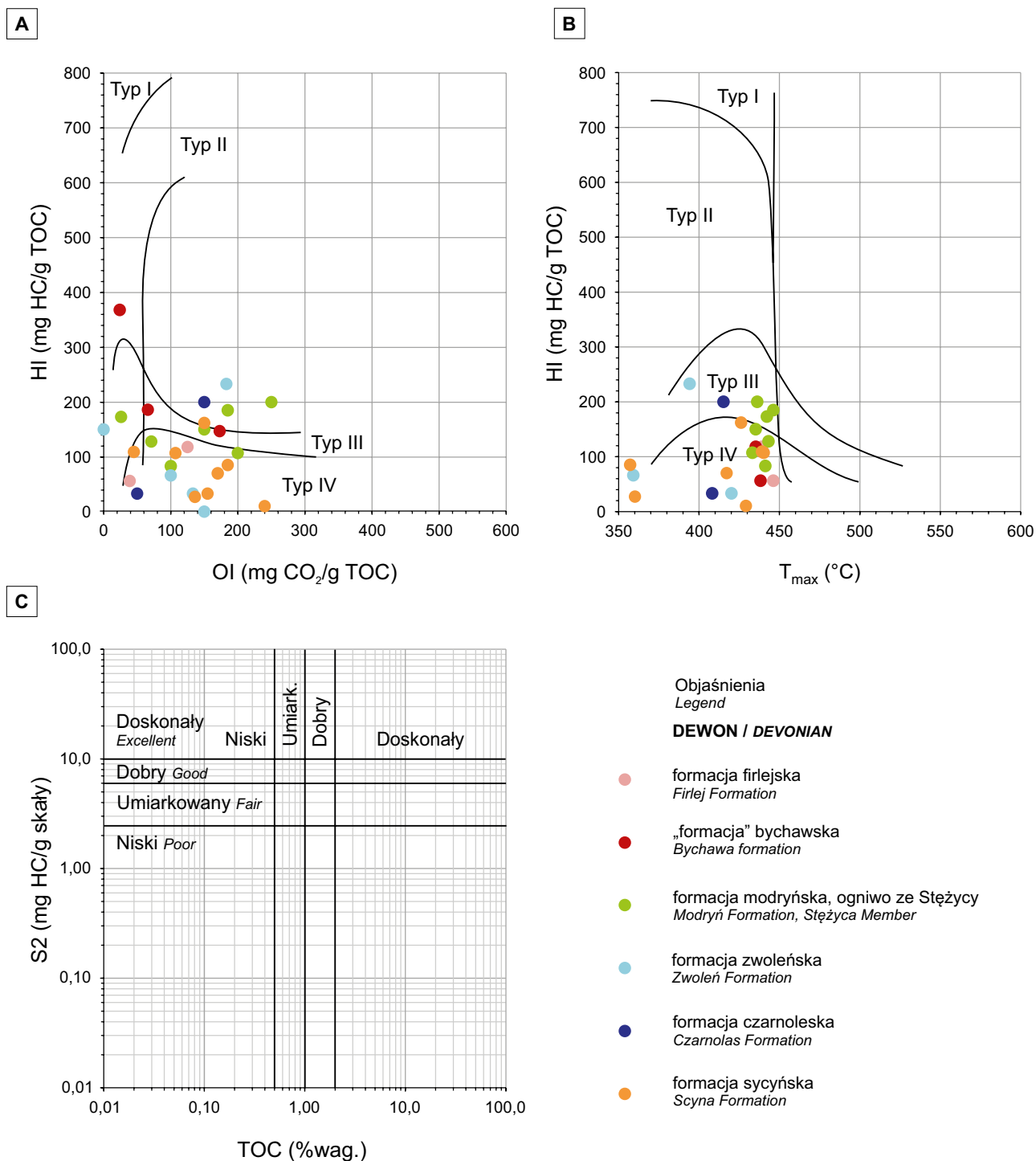


Fig. 45. Diagramy klasyfikacyjne parametrów (A) HI vs OI, (B) HI vs T_{max}, (C) S₂ vs TOC dla wyników analizy Rock-Eval próbek skal dewonu

Classification diagrams of (A) HI vs OI, (B) HI vs T_{max}, (C) S₂ vs TOC for the Rock-Eval analysis results of Devonian rock samples

JURA

Formacja głowaczowska. Formację głowaczowską przebadano jedną próbką pobraną z głęb. 1023,0 m. Zawartość TOC w próbce jest stosunkowo niska i wynosi 0,56% wag. skały. Położenie wyniku analizy próbki na diagra-

mach klasyfikacyjnych typu kerogenu (fig. 44A, B), a także niskie wartości HI oraz stosunku S₂/S₃ (tab. 31) wskazują na obecność kerogenu typu IV, który jest jałowy w kontekście generacji węglowodorów. Kerogen typu IV to szczątki

substancji organicznej różnego pochodzenia, które były depolonowane w warunkach tlenowych (Dembicki, 2017). Z uwagi na typ zawartego w skale kerogenu oraz niską wartość parametru S2 (<2,5 mg HC/g skały), mimo wartości TOC spełniającej minimalne kryterium dla skał macierzystych, potencjał węglowodorowy badanego horzontu

jest niski (fig. 43, 44C). Ponadto, bardzo niska wartość wskaźnika nasycenia ropą wskazuje na to, że utwory formacji głowaczowskiej nie występują również w charakterze skały zbiornikowej. Stopień dojrzałości termicznej materii organicznej zawartej w formacji głowaczowskiej odpowiada granicy diagenety z katagenezą (fig. 43).

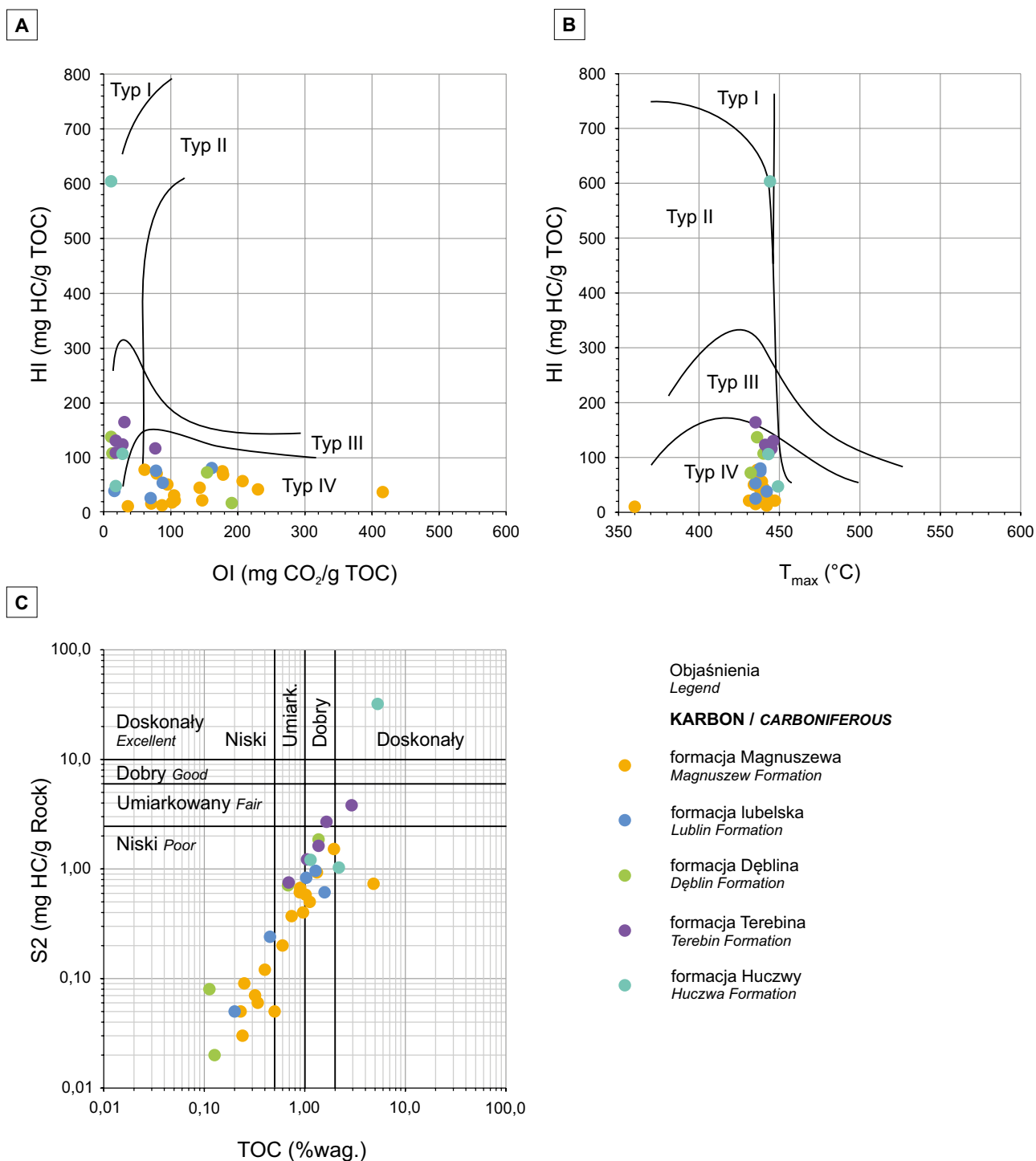


Fig. 46. Diagramy klasyfikacyjne parametrów (A) HI vs OI, (B) HI vs T_{max}, (C) S2 vs TOC dla wyników analizy Rock-Eval próbek skał karbonu

Classification diagrams of (A) HI vs OI, (B) HI vs T_{max}, (C) S2 vs TOC for the Rock-Eval analysis results of Carboniferous rock samples

KARBON

Formacja Magnuszewa. Formację Magnuszewa w otworze Maciejowice IG 1 charakteryzuje duża miąższość (764,0 m). Utwory te przebadano za pomocą 17 próbek pochodzących z interwału głębokości między 1852,5 a 2568,2 m, a odstęp między opróbowanymi horyzontami w profilu formacji wahają się między 21 a 130 m (średnio 44 m). Zawartość węgla organicznego jest zróżnicowana (TOC = 0,23–4,83% wag.; *tab. 31*), z podwyższonymi wartościami (TOC >1,0% wag.) w dolnej części (poniżej 2324,0 m) badanego interwału oraz maksymalną stwierdzoną wartością (TOC = 4,83% wag.) w próbce pobranej najbliżej stropu formacji. Wartości wskaźnika wodorowego (maksimum HI = 77 mg HC/g TOC) oraz stosunku S2/S3 (maksimum S2/S3 = 1,3) są bardzo niskie, co wskazuje na obecność silnie zdegradowanej materii organicznej. We wszystkich przebadanych próbkach formacji Magnuszewa stwierdzono jałowy kerogen typu IV (*fig. 46A, B*). Analiza mikroskopowa materii organicznej sugeruje, że skały te zawierają przede wszystkim lądową materię organiczną (patrz Klimuszko, ten tom). Jednak deponowany materiał, najprawdopodobniej wskutek natlenienia osadów, nie jest w stanie generować znaczących ilości węglowodorów. Z uwagi na powyższe, potencjał generacyjny tych skał jest słaby (*fig. 43, 46C*), a niskie wartości OSI (*tab. 31*) sugerują, że nie zawierają one w swoim składzie również węglowodorów migracyjnych. Dojrzałość termiczna skał wyinterpretowana na podstawie wartości T_{max} wyników analiz, w których wartości parametru S2 przekraczają 0,2 mg HC/g skały (*fig. 43*), na całej długości profilu formacji odpowiada wczesnemu oknu ropnemu.

Formacja lubelska. Utwory formacji lubelskiej przebadano 5 próbkami pobranymi z interwału głębokości 2636,0–2879,2 m, w średnich odstępach co 60,8 m (39–78 m). Całkowita zawartość węgla organicznego waha się między 0,20 a 1,57% wag. skały (*tab. 31, fig. 43*). Zawarty w próbkach kerogen to jałowy kerogen typu IV (*fig. 46A, B*). Według analizy mikroskopowej zawarta w skałach materia organiczna ma przede wszystkim lądowe pochodzenie, z pewnym udziałem materiału ze źródeł morskich (patrz Klimuszko, ten tom). Podobnie jak w przypadku formacji Magnuszewa utwory formacji lubelskiej w tej lokacji były deponowane najprawdopodobniej w warunkach tlenowych. Mimo podwyższonych wartości TOC w części próbek (>1% wag.), potencjał węglowodorowy jest niski w obrębie całego profilu jednostki (S2 <2,5 mg HC/g skały; *fig. 43, 46C*). Bardzo niskie wartości OSI (maksimum OSI = 11 mg HC/g TOC) wskazują na brak obecności węglowodorów migracyjnych w składzie skał. Stopień dojrzałości substancji organicznej zawartej w utworach formacji lubelskiej jest niski i odpowiada wczesnemu oknu ropnemu (*fig. 43*).

Formacja Dęblina. Formację Dęblina przebadano w sumie 5 próbkami, przy czym cztery przypisano do ogniw kumowskiego, a jedną do ogniw bużańskiego formacji. Próbkę pochodzą z głęb. 2995,0–3163,7 m i były pobrane w odstępach wahających się od 37 do 87 m (średnio

56,2 m). Z uwagi na zbliżone wartości parametrów dla obydwu ogniw, interpretacji wyników dokonano kolektywnie dla wszystkich próbek formacji. Całkowita zawartość węgla organicznego w profilu maleje wraz ze wzrostem głębokości od ponad 1,0% wag. skały w stropie do ilości znikomych w spągu (TOC <0,2% wag.; *tab. 31; fig. 43*). W utworach formacji występuje przede wszystkim kerogen typu IV (*fig. 46A, B*). Stosunkowo wysokie wartości wskaźników S2/S3 oraz pozycja wyników na diagramie klasyfikacyjnym typu kerogenu HI vs OI (*fig. 46A*) w próbkach z głęb. 2995,0 i 3032,0 m sugeruje obecność gazotwórczego kerogenu typu III w charakterze domieszki. Źródłem kerogenu typu III są szczątki roślin lądowych, a w szczególności materiał drzewny. Z uwagi na niską ilość wygenerowanych podczas pirolizy węglowodorów (S2 <2,5 mg HC/g skały), potencjał generacyjny formacji Dęblina jest niski (*fig. 46C*). Wartości OSI próbek (5–75 mg HC/g TOC) wskazują na syngenetyczny charakter zawartych w skale węglowodorów. Dojrzałość termiczna skał, podobnie jak w wyżej zalegających formacjach karbonu, odpowiada wczesnemu oknu ropnemu.

Formacja Terebina. Z utworów formacji Terebina pobrano 4 próbki z głęb. 3261,0–3447,0 m. Odstępy między opróbowanymi horyzontami w profilu formacji wahają się między 42 a 51 m (średnio 46,5 m). Parametr TOC we wszystkich przebadanych próbkach omawianego interwału przekracza wartość graniczną dla potencjalnych skał macierzystych (TOC >0,5% wag.; *tab. 31; fig. 43*). Pomimo stosunkowo podwyższonych zawartości węgla organicznego są to skały o niskim (próbki z głęb. 3261,0; 3397,2; 3447,0 m) lub umiarkowanym (próbki z głęb. 3312,0; 3355,0 m) potencjale węglowodorowym (*fig. 46C*). Niska wartość OSI (maksimum OSI = 24 mg HC/g TOC) świadczy o syngenetycznym charakterze zawartych w skale węglowodorów. Zgodnie z wynikami analizy mikroskopowej materii organicznej rozproszonej w utworach formacji Terebina, zawarty w niej materiał ma mieszane morsko-lądowe źródło (patrz Klimuszko, ten tom). Pozycja wyników na diagramach klasyfikacyjnych typu kerogenu (*fig. 46A, B*) wskazuje na obecność mieszaniny jałowego kerogenu typu IV z gazotwórczym kerogenem typu III, sugerując warunki tlenowe w trakcie depozycji osadów. Dojrzałość termiczna tych skał odpowiada warunkom środkowego okna ropnego (*fig. 43*).

Formacja Huczwy. Miąższość formacji Huczwy w omawianym otworze wynosi zaledwie 35,7 m. Z rdzeni wiertniczych zostały pobrane 3 próbki, pochodzące z interwału głębokości między 3469,1 a 3499,5 m. Odstępy między próbkami wahają się od 14 do 17 m (średnio 15,2 m). Jest to najbogatsza w węgiel organiczny jednostka przebadana w otworze Maciejowice IG 1. Mediana wartości TOC wynosi 2,18% wag. (*tab. 31; fig. 43*). Próbkę z głębokości 3482,9 m wyróżnia się najwyższą wartością TOC (5,29% wag.), S2 (31,99 mg HC/g skały) oraz HI (604 mg HC/g TOC) wśród wszystkich przebadanych próbek. Omawiana próbka zawiera w swoim składzie najprawdopodobniej

bogaty w siarkę, ropotwórczy kerogen typu IIS. Na diagramie klasyfikacyjnym HI vs OI (fig. 46A) wyniki próbki są zlokalizowane w polu, w którym lokalizują się zarówno próbki zawierające kerogen typu I, jak i typu IIS (Dembicki, 2017). Drugi diagram klasyfikacyjny (fig. 46B) plasuje wynik analizy w obrębie pola odpowiadającego zarówno kerogenowi typu I, jak i kerogenowi typu II. Kerogen typu I ma ropotwórczy charakter i powstaje ze szczątków słodkowodnych alg i bakterii, najczęściej w warunkach jeziornych, lecz w niektórych przypadkach również w wodach brakicznych oraz w obrębie lagun (Dembicki, 2017). Biorąc pod uwagę środowisko depozycji formacji z Huczwy, która jest genetycznie powiązana z górnowizeńską transgresją morską (Waksmundzka, 2010a), prawdopodobne jest, że obecna na głęb. 3482,9 m materia organiczna ma pochodzenie morskie. Źródłem kerogenu typu IIS są bogate w siarkę szczątki morskich alg i bakterii, a także pyłków, spor, ży-

wic, wosków i kutikuli roślin lądowych. Z tego typu materii organicznej może zostać wygenerowana zarówno ropa naftowa, jak i gaz ziemny (Dembicki, 2017). Środowisko depozycji pozwala przewidywać morski charakter materii organicznej rozproszonej w utworach formacji Huczwy. Jednakże, aby jednoznacznie określić źródło zachowanych szczątków, należałoby uzupełnić badania materii organicznej o analizę elementarną lub chromatograficzną. Pozostałe dwie próbki zawierają w swoim składzie mieszaninę kerogenu typu III z kerogenem typu IV. Potencjał węglowodorowy skał jest niski dla próbek z głęb. 3469,1 i 3499,5 m oraz doskonały dla próbki z głęb. 3482,9 m (fig. 46C). Wartość OSI w zakresie od 14 do 46 mg HC/g TOC (tab. 31) wskazuje na syngenetyczny charakter zawartych w skale węglowodorów. Dojrzałość termiczna materii organicznej w profilu formacji Huczwy odpowiada środkowemu etapowi okna ropnego (fig. 43).

DEWON

Formacja firlejska. Formacja firlejska została zbadana jedynie 2 próbkami z głęb. 3504,4 m oraz 3517,3 m. Całkowita zawartość węgla organicznego w tych próbkach jest różna i wynosi odpowiednio 1,23 oraz 0,16% wag. skały (tab. 31). Zawierają one w swoim składzie jałowy kerogen typu IV (fig. 45A, B), co wiąże się z niskim potencjałem węglowodorowym tych skał (fig. 43, 45C). Niska wartość OSI (mediana OSI = 31 mg HC/g TOC) wskazuje na brak węglowodorów pochodzących z migracji. Dojrzałość termiczna formacji, wyinterpretowana na podstawie wyników analizy próbki z głęb. 3504,4 m ($S_2 > 0,2$ mg HC/g skały), odpowiada środkowemu etapowi okna ropnego.

„Formacja” bychawska. Utwory „formacji” bychawskiej przebadano na podstawie 3 próbek z głęb. 3591,5–3721,9 m, pobranych w odstępach 57–73 m (średnio 65,2 m). Skały te charakteryzuje niska całkowita zawartość węgla organicznego (TOC = 0,19–0,99% wag.; tab. 31) oraz podwyższone, względem pozostałych omawianych forma-

cji, wartości wskaźnika wodorowego (HI = 147–368 mg HC/g TOC). Z uwagi na wartości HI oraz umiejscowienie wyników na diagramach klasyfikacyjnych typu kerogenu (fig. 45A, B) w ich składzie najprawdopodobniej występuje kerogen typu III (próbki z głęb. 3591,5 i 3721,9 m) oraz mieszany kerogen typu III/II (próbka z głęb. 3664,5 m). Z wymienionych typów kerogenu, w adekwatnych warunkach temperaturowych, może być generowany odpowiednio gaz ziemny oraz ropa naftowa i gaz ziemny. Potencjał węglowodorowy „formacji” bychawskiej waha się od niskiego (próbki z głęb. 3591,5 i 3721,9 m) do umiarkowanego (próbka z głęb. 3664,5 m; fig. 45C). Wartość OSI w zakresie 44–68 mg HC/g TOC (tab. 31) wskazuje na syngenetyczny charakter obecnych w skale węglowodorów. Stopień dojrzałości substancji organicznej rozproszonej w utworach „formacji” bychawskiej odpowiada środkowemu etapowi okna ropnego.

PODSUMOWANIE

W otworze Maciejowice IG 1 większość przebadanych formacji zawiera materię organiczną deponowaną w warunkach tlenowych. Z tego względu w większości próbek stwierdzono obecność jałowego kerogenu typu IV. Nieliczne próbki formacji Terebina, formacji Dęblina i formacji Huczwy karbonu zawierają gazotwórczy kerogen typu III zmieszany z kerogenem typu IV. W utworach dewońskiej „formacji” bychawskiej występuje zarówno kerogen typu III, jak i mieszany kerogen typu III/II, a jedna z próbek formacji firlejskiej zawiera w swoim składzie najprawdopodobniej ropo- i gazonośny kerogen typu IIS.

Potencjał węglowodorowy opracowywanych skał jest niski. Jedynie pojedyncze próbki formacji Terebina oraz

„formacji” bychawskiej posiadają umiarkowaną możliwość generowania węglowodorów. Doskonały potencjał węglowodorowy posiada jedna próbka pochodząca z formacji Huczwy.

Stopień przeobrażenia termicznego materii organicznej wykazuje charakterystyczny wzrost wraz z głębokością pogrzebienia od warunków odpowiadających końcowi diagenety w utworach formacji głowaczowskiej (jura) do środkowego etapu okna ropnego w utworach formacji Dęblina, formacji Terebina i formacji Huczwy (karbon). Z uwagi na ograniczenia metody, w utworach dewonu i syluru nie została określona dojrzałość termiczna skał.

Przemysław KARCZ

ANALIZA TEMPA DEPOZYCJI ORAZ MODELOWANIE HISTORII TERMICZNEJ I WARUNKÓW POGRZEBANIA

METODY BADAŃ

Analiza tempa depozycji i modelowanie historii termicznej i warunków pogrzebania dla otworu Maciejowice IG 1 przeprowadzono przy użyciu oprogramowania PetroMod na licencji firmy Schlumberger. Jednowymiarowy model otworu zbudowano na podstawie zestawu kluczowych podstawowych danych wejściowych, niezbędnych do tego celu oraz do prawidłowego funkcjonowania modelu. Do grupy tych danych należą dane stratygraficzne, litologiczne, wielkość erozji wraz z jej ramami czasowymi, dane paleogeograficzne, paleobatymetryczne oraz współczesnego przepływu ciepła i jego paleoprzepływu. Innymi istotnymi danymi, które są potrzebne do uruchomienia i poprawnej kalibracji modelu są dane dystrybucji współczesnych temperatur w otworze wiertniczym oraz dane dojrzałości materii organicznej, zazwyczaj wyrażane jako refleksyjność wityritu lub refleksyjność materii wityritopodobnej. Wydzielonym na potrzeby modelu jednostkom stratygraficznym przypisano głębokości stropu i spągu oraz wynikające z nich miąższości, a także wiek liczbowy, który jest mapowany domyślnie na międzynarodową tabelę stratygraficzną z 2008 r. Model skalibrowano do dwóch typów danych tj. współczesnych temperatur w otworze wiertniczym oraz refleksyjności wityritu. Współczesny reżim cieplny i rozkład współczesnych temperatur odczytano z map gęstości

strumienia ciepłego i map rozkładu temperatur na różnych głębokościach z pracy zbiorowej pod redakcją Góreckiego (2006). Przyczyniło się to do pokrycia wartościami temperatur całego profilu otworu, aż do jego spągu włącznie. Z kolei, dane refleksyjności wityritu (Grotek i in., 2000b) pozyskano wyłącznie dla interwału karbonu i pokryły 1500-metrowy odcinek profilu otworu. Niestety, ze względu na brak tych danych dla nadkładu karbonu (~1800 m profilu) oraz jego podłoża (~1500 m profilu), krzywa kalibracyjna dla tych interwałów nie została dowiązana do pomierzonych laboratoryjnie danych refleksyjności wityritu. Dane dojrzałości termicznej (refleksyjności) dowiązано do profilu otworu algorytmem Sweeney'a i Burnhama (1990), domyślnie zaimplementowanym w bibliotece programu. Ramy czasowe luk stratygraficznych i zdarzeń erozyjnych odczytano z profilu otworu, natomiast skalę zerodowanych utworów zrekonstruowano na podstawie analizy obszarów o pełniej zachowanych profilach. Proces kalibracji modelu do rzeczywistych danych, uzyskanych w trakcie pomiarów, również odegrał istotną rolę w procesie rekonstrukcji miąższości zerodowanych osadów. Średnia temperatura powierzchni Ziemi została zastosowana automatycznie przez bibliotekę programu na podstawie danych opublikowanych w pracy Wygrali (1989).

ANALIZA TEMPA DEPOZYCJI

Najstarszymi skałami osadowymi w otworze Maciejowice IG 1 są utwory sylurskie. Nie zostały one w pełni przewiercone i są reprezentowane wyłącznie przez 57,5-metrowy interwał skał drobnoklastycznych. Wymodelowane tempo depozycji wynoszące ok. 30 m/mln lat nie może być zatem traktowane jako reprezentatywne dla całego syluru, z powodu pozyskania danych z niepełnego profilu.

Wraz z początkiem dewonu (lochkow) rozwinęła się sedymentacja osadów mułowych i iłowych, które akumulowały w tempie do ok. 180 m/mln lat (fig. 47). Powstał drobnoklastyczny litosom o miąższości rzędu ok. 750 m.

W późniejszym okresie wczesnego dewonu (prag-ems), zmniejszyły się zarówno tempo depozycji osadów do ok. 30 m/mln lat, jak i subsydencja podłoża. Depozycja pragu i emsu została zdominowana przez materiał drobnoklastyczny, choć w nie tak dużej mierze, jak w lochkowie. W środkowym i późnym dewonie tempo sedymentacji utrzymywało się na podobnym poziomie jak w pragu i emsie i wynosiło ok. 28–31 m/mln lat. W późnym dewonie zmienił się charakter sedymentacji na typowo węglanowy. Utwory franu i famenu zostały zdominowane przez wapień, dolomity oraz margle.

W missisipie (turnej-wizen-serpuchow) wyraźnie zmienił się charakter sedymentacji. Powszechnie w późnym dewonie osady węglanowe zostały zastąpione przez osady drobnoklastyczne, które stanowią ok. 60% profilu wizenu oraz niemalże 90% profilu serpuchowu. Tempo depozycji w granicach ok. 30–35 m/mln lat oraz właściwości subsydencji w missisipie pozostały zbliżone do tych wyinterpretowanych dla franu i famenu.

Wraz z początkiem baszkiru wyraźnie wzrosło tempo depozycji do ok. 130 m/mln lat, a w moskowie osiągnęło wartość rzędu ok. 430 m/mln lat (fig. 47). Tak wysokie tempo depozycji przyczyniło się do wyraźnego wzrostu subsydencji podłoża. W późnym pensylwanie (wczesny kazimow) miało miejsce zdarzenie tektoniczne o charakterze wypiętrzającym, które doprowadziło do spłylenia basenu karbońskiego i erozji górnych warstw moskowie.

Z początkiem depozycji osadów cechsztynu uaktywniła się subsydencja o wolnym i łagodnym charakterze. Nowo powstały basen cechsztyński był płytki i rozległy, co sprzyjało akumulacji osadów chemicznych (do 30% anhydrytów) oraz węglanowych (do 20% wapieni). Oszacowane tempo depozycji cyklotemów cechsztyńskich nie przekroczyło 3 m/mln lat.

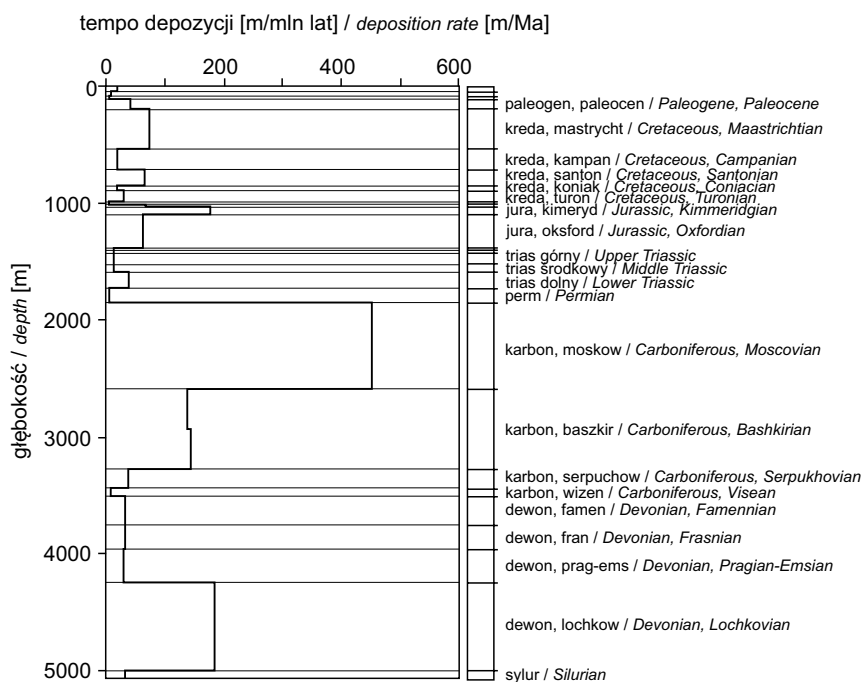


Fig. 47. Tempo depozycji osadów w profilu otworu Maciejowice IG 1

Sedimentation rate for the Maciejowice IG 1 borehole

Tempo sedymentacji w trasie dolnym, środkowym i górnym było niskie i oscylowało w granicach od ok. 10 do maksymalnie 36 m/mln lat. Wczesnotriasowy gruboklastyczny charakter sedymentacji, w którym dominowały frakcje piaszczyste, w triasie środkowym został zastąpiony przez sedymentację drobnoklastyczną i węglanową. Z kolei trias górny składa się już wyłącznie z utworów klastycznych z przewagą utworów drobnoklastycznych. Pod koniec późnego triasu miały miejsce ruchy wznoszące, które doprowadziły początkowo do spłylenia, a następnie do wypiętrzania basenu permsko-triasowego i erozji utworów triasu górnego. Skutkiem tego wydarzenia jest luka stratygraficzna obejmująca całą wczesną jurę (hetang–toark) oraz wczesną część jury środkowej (aalen–bajos).

W późnej jurze środkowej powstał basen, charakteryzujący się początkowo niskim tempem sedymentacji wynoszącym ok. 8–12 m/mln lat (baton–kelowej), a następnie większym, wynoszącym ok. 66 m/mln lat w oksfordzie oraz ok. 176 m/mln lat w kimerydzie (fig. 47). W jurze zmieniał się wyraźnie typ deponowanego materiału. W batonie dominujące są utwory klastyczne, zwłaszcza piaskowce, którym towarzyszy niewielka ilość węglanów. Natomiast w kelowej udział węglanów wyraźnie wzrósł. Z kolei oksford i kimeryd zostały całkowicie zdominowane

przez wapienie i margle. W najpóźniejszej jurze tektoniczne ruchy wypiętrzające spowodowały spłylenie basenu i przyczyniły się do erozji utworów kimerydu.

Luka stratygraficzna, obejmująca tyton i berias, zakończyła się wraz z sedymentacją drobnoklastycznych osadów walażynu i hoterywu. Utwory wyższego hoterywu również zostały zerodowane w wyniku kolejnych tektonicznych ruchów wypiętrzających, czego wynikiem jest luka stratygraficzna obejmująca barrem i apt.

Pod koniec wczesnej kredy, tj. w albie, przeważała sedymentacja osadów klastycznych. Jednak od cenomanu do mastrychtu włączając basen kredowy został wyraźnie zdominowany przez węglany oraz osady węglanowo-krzemionkowe. Oszacowane tempo sedymentacji dla kredy było zmienne i wynosiło od ok. 2 do maksymalnie 67 m/mln lat.

W paleocenie, przy tempie sedymentacji wynoszącym ok. 50 m/mln lat, miała miejsce sedymentacja utworów węglanowo-krzemionkowych i marglistych. W późnym paleocenie nastąpiły ruchy wypiętrzające, które doprowadziły do powstania luki stratygraficznej eocenu. Z kolei w oligocenie i miocenie, w warunkach bardzo niskiego tempa sedymentacji sięgającego maksymalnie ok. 7 m/mln lat, nastąpiła depozycja osadów klastycznych z wyraźną dominacją ilastych i mułkowych.

MODELOWANIE HISTORII TERMICZNEJ I WARUNKÓW POGRZEBANIA

Historię pogrzebania dla otworu Maciejowice IG 1 zrekonstruowano na jednowymiarowym modelu, który zobrazował główne wydarzenia natury tektonicznej i termicznej przedstawionego profilu otworu (fig. 48). W celu kalibracji

modelu użyto dwóch rodzajów danych, tj. zestawu 6 wartości współczesnych temperatur w otworze Maciejowice IG 1 odczytanych z map rozkładu temperatur na różnych głębokościach (Górecki, 2006) oraz zestawu 14 pomiarów

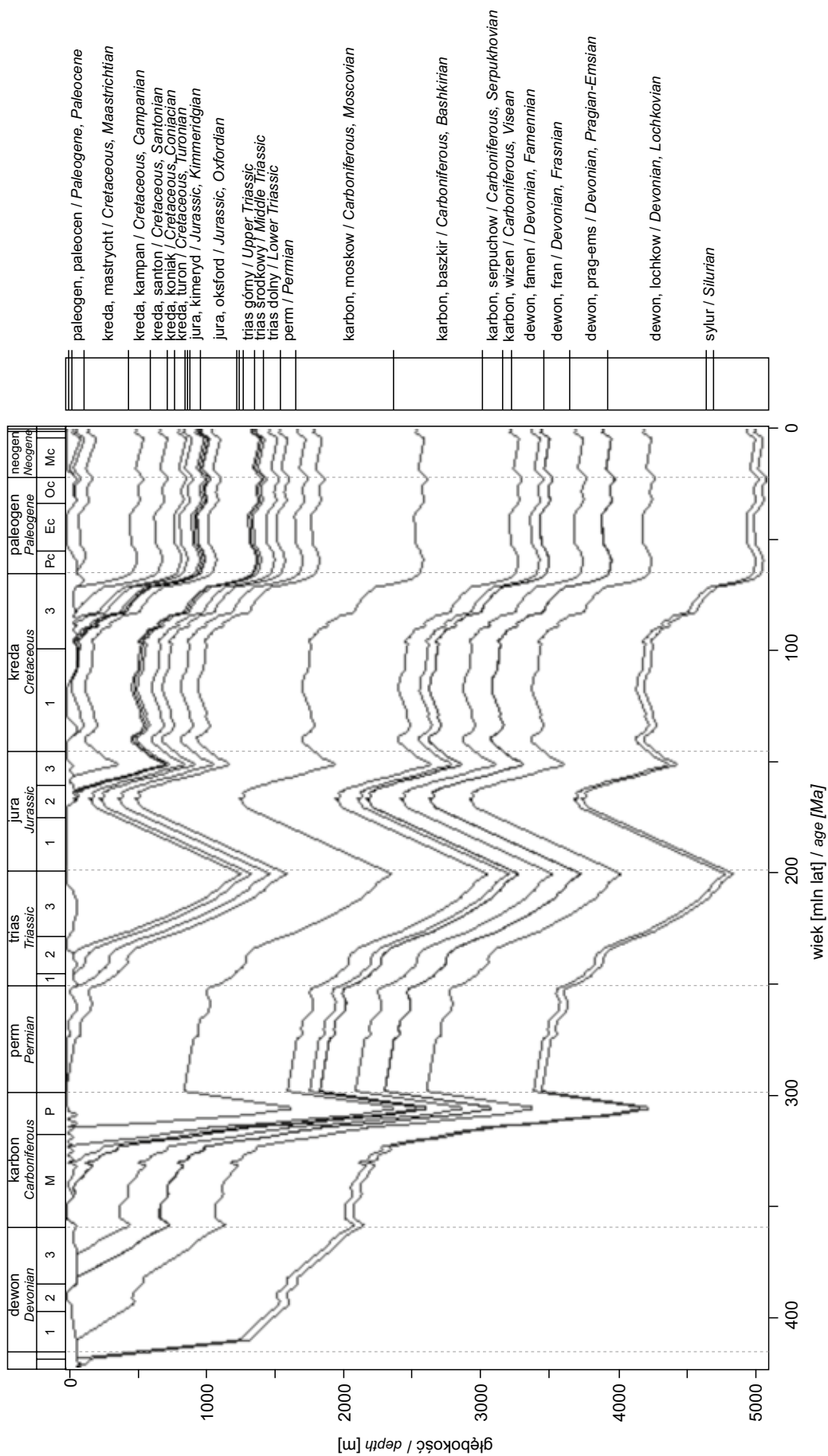


Fig. 48. Historia pogrzeżania osadów w profilu otworu Maciejowice IG 1

1, 2, 3 – dolny, środkowy, górny; M – missisip, P – pensylwan, Pe – eocen, Ec – oligocen, Mc – miocen

Burial history for the Maciejowice IG 1 borehole

1, 2, 3 – Lower, Middle, Upper; M – Mississippian, P – Pennsylvanian, Pe – Eocene, Ec – Oligocene, Mc – Miocene

refleksyjności wityryny (Grotek i in., 2000b). Dane kalibracyjne współczesnych temperatur pokryły równomiernie cały profil otworu, natomiast dane refleksyjności wityryny zmierzono wyłącznie na próbkach karbońskich, pokrywając równomiernie serpuchow, baszkir i moskow (fig. 49). W związku z powyższym, wiarygodność prezentowanego modelu jest niejednoznaczna. Gęstość współczesnego strumienia ciepłego odczytano z mapy rozkładu gęstości ziemskiego strumienia ciepłego na Niżu Polskim (Górecki, 2006), na podstawie którego przyjęto wartość rzędu 50 mW/m^2 . Dane przewodnictwa cieplnego skał dowiązано do profilu otworu algorytmem Cermaka i in. (1984) oraz Waplesa i Tiersgaarda (2002) domyślnie implementowanym z biblioteki programu.

Miąższości zerodowanych utworów zrekonstruowano na podstawie ekstrapolacji modelowanego profilu do najbliższych otworów wiertniczych, gdzie nie odnotowano erozji wśród określonych jednostek stratygraficznych.

Rekonstrukcja całkowitej miąższości zerodowanych utworów permu dolnego oraz moskoku górnego ujawniła, że maksymalna zerodowana miąższość nie powinna być większa niż 700–800 m. Z kolei sumaryczna miąższość zerodowanej jury dolnej i środkowej, objętej luką stratygraficzną między hetangiem i bajosem włącznie, mogła wahać się w granicach 600–1000 m. Kolejne, młodsze zdarzenie erozyjne odpowiadające luce stratygraficznej beriasu i tytonu, które ścięło utwory kimerydu górnego, zostało oszacowane na ok. 200 m, a druga luka odpowiadająca barremowi i aptowi – na maksymalnie 100 m. Ostatnie dwa najmłodsze wydarzenia erozyjne, z eocenu i pliocenu, zostały pominięte ze względu na ich zdecydowanie mniejsze znaczenie.

W skali regionu najstarszymi są skały kambru, ordowiku i syluru, zdeponowane na prekambryjskim podłożu krystalicznym, w basenie sedimentacyjnym niższego paleozoiku. Ten fragment historii rozwoju basenu nie jest jednak widoczny w profilu otworu Maciejowice IG 1, gdyż najstarsze nawiercone tu skały osadowe są późnosylurskie. W konsekwencji, możliwa do interpretacji historia pogrzebania zamyka się w ramach czasowych od późnego syluru do czwartorzędu. W tej skali czasu w otworze Maciejowice IG 1 wyróżniono kilka faz szybkiego pogrzebania i wypiętrzania oraz kilka faz o zdecydowanie wolniejszym charakterze.

Profil otworu rozpoczyna się okresem bardzo szybkiego pogrzebania, który przypada na późny sylur–lochkow. W tym okresie są deponowane osady o wybitnie klastycznym charakterze oraz znacznej miąższości. W kolejnej fazie, tj. w późnym wczesnym dewonie, dewonie środkowym i późnym oraz wczesnym karbonie mają miejsce znacznie wolniejsza subsydencja i pogrzebanie. Utwory syluru oraz spąg miąższego lochkowu zostają pogrzebane na głęb. ok. 2000–2300 m (fig. 48), gdzie dominowały temperatury rzędu $75\text{--}90^\circ\text{C}$.

W późnym missisipie rozpoczęła się kolejna faza szybkiej subsydencji. Faza ta trwała do pensylwanu środkowego, doprowadzając do pogrzebania utwory syluru oraz lochkowu na głęb. rzędu 3500–4000 m, gdzie wymodelowane temperatury osiągnęły wartości w granicach $120\text{--}140^\circ\text{C}$. Wraz z nastaniem późnego moskoku inwersja tektoniczna obszaru, trwająca do końca karbonu, spowodowała szybkie wypiętrzanie, czemu towarzyszyła erozja. Procesowi temu towarzyszyło równoczesne wyniesienie najstarszych warstw

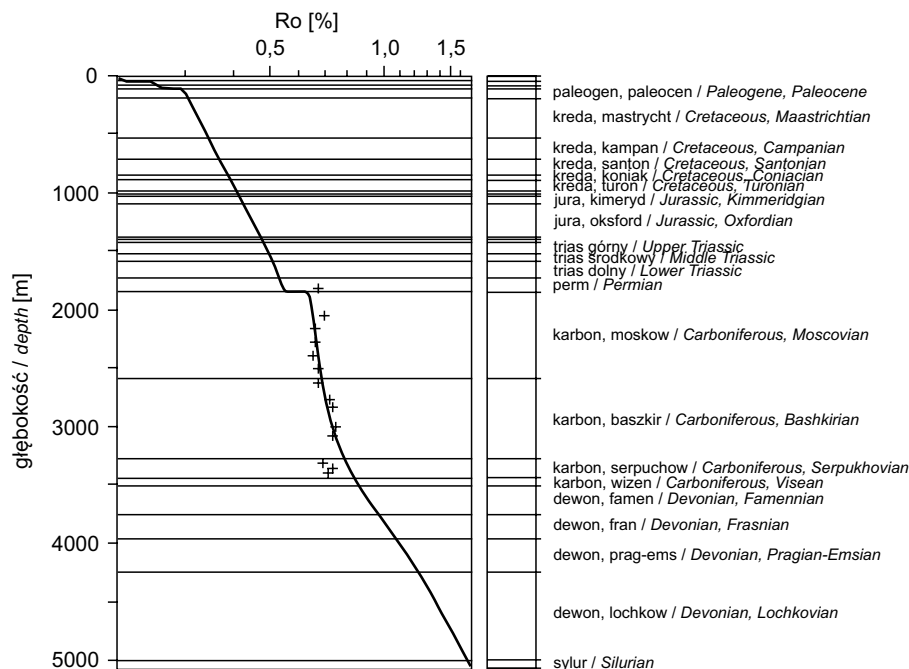


Fig. 49. Kalibracja modelu dojrzałości termicznej (gruba czarna linia) pomiarami refleksyjności wityryny (Ro, krzyżyki) dla otworu Maciejowice IG 1

Calibration of the thermal maturity model (thick black line) with vitrinite reflectivity (Ro, crosses) for the Maciejowice IG 1 borehole

analizowanego profilu na głęb. ok. 2700–3500 m, w strefę temperatur ok. 101–121°C.

Dopiero w późnym permie rozpoczął się okres powolnej subsydencji podłoża, niskiego tempa sedymentacji i jednocześnie powolnego pogrzebania. Trwało to do triasu środkowego, w którym doszło do przyspieszenia subsydencji. Trend ten utrzymał się do końca późnego triasu. Najstarsze utwory w profilu, tj. sylur i lochkow, zostały z końcem triasu pogrzebane do głęb. 4000–4700 m (fig. 48), gdzie wymodelowane temperatury mieszczą się w zakresie 148–167°C.

Wraz z początkiem wczesnej jury (wczesny hetang) nastąpiły szybkie ruchy wypiętrzające, które trwały do późnego bajosu włącznie. Wspomniana inwersja tektoniczna jest odpowiedzialna za znaczącą erozję oraz powstanie szerokiej czasowo luki stratygraficznej. Efektem tej inwersji tektonicznej jest wyniesienie najstarszych w profilu utworów najwyższego syluru i dewonu dolnego do głęb. rzędu 3000–3700 m i temperatur 100–120°C.

W jurze środkowej rozpoczęła się kolejna faza szybkiej subsydencji, która trwała do końca późnej jury. W tej fazie deponowane były utwory batonu i keloweju oraz oksfordu i kimerydu. Na przełomie jury i kredy miała miejsce faza wypiętrzania, po której nastąpił okres niewielkiej subsydencji, małoskalowego wypiętrzania oraz stagnacji. Efektem tej fazy była depozycja utworów walanżynu i hoterywu oraz erozja warstw górnej kredy dolnej.

Z początkiem cenomanu nastąpiła kolejna faza szybko go pogrzebania. Skutkiem tego, była depozycja pełnego profilu kredy górnej i paleocenu. W tym czasie profil otworu Maciejowice IG 1 uzyskał swoją maksymalną miąższość ok. 5000 m, a najwyższe temperatury odnotowano w spażu dewonu dolnego i syluru, gdzie model wykazał 163°C.

Wraz z nastaniem eocenu miały miejsce krótkie okresy stagnacji, naprzemiennie występujące z ruchami wypiętrzającymi małej skali, które doprowadziły do powstania luki stratygraficznej eocenu. W późnym eocenie rozpoczął się okres wolnej subsydencji i stagnacji, który kontynuował się podczas akumulacji osadów oligocenu i miocenu. Niewielkiej skali ruchy wypiętrzające zaobserwowano również w pliocenie, co przyczyniło się do powstania najmłodszej w profilu luki stratygraficznej.

Przeprowadzone w otworze Maciejowice IG 1 modelowanie umożliwiło również zdefiniowanie wyraźnych granic stref dojrzałości termicznej w całym profilu otworu w kontekście generowania węglowodorów. Strefa górnego okna ropnego pokrywa prawie cały moskow. Główne okno ropne obejmuje swoim zasięgiem piętra od turneju do baszkiru włącznie. Granice dolnego okna ropnego zawierają famen, fran, prag i ems. Natomiast lochkow i sylur znalazły się w strefie generowania gazów mokrych.