

WYNIKI BADAŃ MATERII ORGANICZNEJ, HISTORII POGRĄŻANIA I EWOLUCJI TERMICZNEJ

Barbara MASSALSKA

WYSTĘPOWANIE I OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA MATERII ORGANICZNEJ W UTWORACH JURY I KREDY

WSTĘP

Niniejszy tekst został napisany na podstawie archiwalnego opracowania Barbary Gondek (Gondek, 1966) oraz interpretacji nowych wyników analiz Rock Eval.

Utwory jury i kredy, a szczególnie utwory jury środkowej występujące w otworze Oświno IG 1, mogą być, z uwagi na przesłanki geologiczne, traktowane jako perspektywistyczne pod kątem obecności złóż ropy naftowej. Otwór zlokalizowany został bowiem w osiowej, najgłębszej części basenu sedymentacyjnego, a na podstawie wykonanych dotąd wierceń stwierdzono brak luk sedymentacyjnych, co stworzyć mogło dobre warunki do zachowania materii organicznej w skałach. We wstępnym etapie prac sporządzono profile geochemiczne wybranych punktów wierceń i zbadano własności fizyczne skał (Sztukowska, 1966). Duże ilości rozproszonej materii organicznej stwierdzonej w osadach jury środkowej, jury górnej i kredy dolnej zdawały się potwierdzać przesłanki geologiczne.

Na etapie bliższego rozpoznawania charakteru chemicznego bituminów i występujących w nich węglowodorów przyjęto program badań dostarczających informacji o stopniu zaawansowania przemian kerogenu w ropę naftową, a także o możliwości istnienia migracji węglowodorów w obrębie badanych skał. Wyjaśnienie obu tych zagadnień miało stać się podstawą dalszych prac nad ustaleniem perspektywiczności utworów jury środkowej i górnej oraz kredy dolnej w środkowej Polsce.

Stopień zaawansowania termicznego przeobrażenia materii organicznej, prowadzący do utworzenia ropy naftowej, określany jest charakterem chemicznym bituminów (Colombo, Sironi, 1961), a szczególnie ilością i jakością zawartych w nich wolnych węglowodorów (Uspienskiy i in., 1964). Do określenia stopnia dojrzałości termicznej kerogenu służą również parametry i wskaźniki analizy pirolitycznej Rock-Eval, w tym parametr T_{max} , który stanowi temperaturę maksymalnej produkcji węglowodorów w drodze crackingu

podczas etapu pirolitycznej analizy Rock-Eval oraz indeks produkcyjności, będący stosunkiem zawartości wolnych węglowodorów w skale do ilości węglowodorów wygenerowanych ze skały w trakcie pirolizy (Dembicki, 2017).

Im więcej jest w bituminach węglowodorów, im bardziej są one zmetanizowane, a tym samym mniej heterogenicznych pochodnych zawierają węglowodory wydzielone z kerogenu, tym dalej posunięta jest przemiana materii organicznej w ropę naftową.

Ogólną charakterystykę bituminów daje określenie ich składu grupowego, tj. oznaczenie w nich ilości olejów, żywic i asfaltenów. Jest to jednak tylko wstępne określenie rodzaju bituminów, gdyż budowa chemiczna poszczególnych składników grupowych może zmieniać się w bardzo szerokich granicach. Samo więc stwierdzenie, że próbka bituminów jest bogata w oleje, nie może być jednoznaczna z uznaniem jej za podobną do ropy naftowej, a zakłada jedynie taką możliwość. Oleje bowiem obok węglowodorów zawierają większe lub mniejsze ilości niskocząsteczkowych związków heterogenicznych i dopiero ilość czystych węglowodorów decydować może o stopniu zmetamorfizowania badanej substancji.

Oznaczenie ilości węglowodorów w bituminach oraz ich charakterystyka chemiczna, poza określeniem stopnia zmetamorfizowania bituminów, pozwala też stwierdzić czy w obrębie badanych skał istnieje możliwość migracji węglowodorów (Philippi, 1965) i jest podstawą porównywania migrujących węglowodorów z ewentualnymi nagromadzeniami ropy naftowej.

Dodatkowo, wiele parametrów i wskaźników obliczeniowych otrzymanych drogą analizy pirolitycznej Rock-Eval pozwala na ogólną charakterystykę skały macierzystej, w tym jej potencjał węglowodorowy dojrzałość termiczną oraz zawarty w niej typ kerogenu.

METODYKA

Ilość substancji organicznej rozproszonej w skałach, ilość chloroformowego ekstraktu bituminów i jego skład grupowy oznaczone zostały w utworach jury i kredy we wstępnych badaniach geochemicznych. Badania te zostały następnie uzupełnione o analizę pirolityczną Rock-Eval dla wybranych próbek jury górnej i środkowej. Analizy te zostały wykonane w ramach prowadzonego obecnie tematu psg *Rozpoznanie potencjału węglowodorowego łupków jurajskich i dolnokredowych na obszarze najbardziej perspektywicznych stref Polski pozakarpackiej*.

W celu ustalenia ilości węglowodorów w ekstraktach bitumicznych oraz poznania ich budowy chemicznej przeprowadzone zostały następujące badania:

- wydzielenie z olejów czystych węglowodorów drogą rozdzielu chromatograficznego na żelu krzemionkowym;
- oznaczenie w wydzielonych węglowodorach współczynnika załamania światła (n_D^{20});
- zbadanie poziomu absorpcji węglowodorów oraz niewęglowodorowej frakcji bituminów w przedziale częstotliwości 500–3400 cm^{-1} ;
- obliczenie tzw. współczynnika migracji, w celu ustalenia, czy w badanych utworach istnieje możliwość migracji węglowodorów. Zgodnie z założeniami Phi-

lippiego (1965), możliwość przemieszczania się węglowodorów przez kapilarne pory skał warunkowana jest prawami absorpcji. Wysokość absorpcji zależna jest z kolei od ilościowych stosunków pomiędzy substancją organiczną a węglowodorami w skale. Dopiero po przekroczeniu ustalonych doświadczalnie wielkości współczynnika migracji, istnieje (z uwagi na prawa absorpcji) możliwość przemieszczania się węglowodorów w ośrodku skalnym;

- wykonanie analiz Rock-Eval sproszkowanych próbek skalnych metodą *bulk rock* opisanej w pracy Behara i in. (2001), których parametry pozwalają na interpretację potencjału węglowodorowego skały macierzystej, jej jakości oraz dojrzałości termicznej, ograniczono do próbek wieku jurajskiego.

Charakterystyka chemiczna substancji bitumicznej i węglowodorów przeprowadzona na próbkach pochodzących z utworów jury i kredy w otworze Oświno IG 1, ze szczególnym uwzględnieniem tych cech, które są istotne przy ustalaniu perspektyw roponośności, a także wyniki badań metodą Rock-Eval podane zostały poniżej.

WYNIKI BADAŃ I INTERPRETACJA

Badania składu grupowego materii organicznej oraz poziomu adsorpcji węglowodorów

W wierceniu Oświno IG1 przebadane zostały utwory jury środkowej i górnej, oraz kredy dolnej i górnej, a wyniki badań przedstawione są poniżej (tab. 11 i 12):

Jura środkowa

Utwory jury środkowej, zalegające w 286,5-metrowej warstwie na głęb. 1933,5–2220,0 m, składają się z naprzemian leżących iłowców, mułowców i piaskowców.

Utwory iłowców i mułowców są bogate zarówno w substancję organiczną (0,49–2,86% wag. skały; średnio 1,53% wag. skały), jak też w bituminy (0,021–0,135% wag. skały; średnio 0,043% wag. skały). Natomiast ilość węglowodorów jest tutaj wyjątkowo niska. Stanowią one nieznaczny procent (3–15% wag.) substancji bitumicznej, a zawartość ich w skale waha się od 0,002 do 0,011% wag. Węglowodory mają ogólnie charakter naftenowy, a zbliżony kształt krzywych absorpcji w podczerwieni wskazuje na bardzo duże podobieństwo w ich budowie chemicznej. Wyjątek stanowi próbka marglistego mułowca z głęb. 1975,3 m (kelowej dolny), w której obserwuje się, przy stosunkowo niskiej ilości ekstraktu bitumicznego (0,026% wag.), wyraźnie parafinowy charakter węglowodorów. Ponadto ilość węglowodorów w ekstrakcie z głęb. 1975,3 m jest znaczna (41% wag.) i wielokrotnie przekracza udział węglowodorów pozostałych próbek jury środkowej (3–16% wag.).

Niewęglowodorowa część olejów zawiera dużą ilość struktur aromatycznych, natomiast węglowodory parafinowe mogą tu występować jako krótkie boczne podstawniki. Poziom adsorpcji, w zakresie 900–200 cm^{-1} , wskazuje na mały stopień zaawansowania przemian substancji bitumicznej.

W utworach piaskowców i margli zarówno ilość węglowodorów, jak ich udział w substancji bitumicznej, oraz ogólny charakter chemiczny nie różni się od pozostałych próbek jury środkowej.

Na podstawie przedstawionych cech, a także wielkości współczynnika migracji, można uznać bituminy i występujące w nich węglowodory utworów jury środkowej za syngenetyczne z osadami.

Jura górna

Jura górna, o miąższości 373,5 m, ciągnie się na głęb. 1560,0–1933,5 m. Tworzą ją głównie iłowce, mułowce i margle. Zawartość substancji organicznej waha się w granicach 0,39–1,44% wag., ilość bituminów 0,012–0,079% wag. Węglowodory występują tu w nieznacznych ilościach (0,003–0,004% wag.).

Zarówno kształt krzywych absorpcji w podczerwieni, jak i wartości współczynnika załamania światła wskazują na różnorodny charakter chemiczny węglowodorów w poszczególnych próbkach jury górnej. Próbkę mułowców z głęb. 1863,0–1921,6 m (oksford środkowy–dolny) charakteryzują się wyraźnie parafinowym charakterem węglowodorów, przy łącznej ilości ekstraktu bitumicznego w wysokości 0,055% wag.

Tabela 11

Wstępna charakterystyka bituminów i węglowodorów ekstrahowanych ze skal jury i kredy

Initial characteristic of bitumen and hydrocarbons extracted from Jurassic and Cretaceous rocks

Chronostratygrafia Chronostratigraphy	Litologia Lithology	Głębokość Depth [m]	Bituminy Bitumen	Oleje Oils	Węglowodory Hydrocarbons			n ²⁰ _D
					w skale in the rock	w bituminach in bitumen	w olejach in oils	
					[%]			
Kreda	mułowiec ¹	1261,3	0,038	48	0,006	17	36	1,4773
	wapień ²	1277,0	0,016	59	0,003	18	31	1,4758
	iłowiec ³	1355,8	0,030	59	0,009	31	53	1,4840
	piaskowiec wapnisty ⁴	1366,0	0,022	22	0,001	6	27	–
	iłowiec ³ , piaskowiec ⁵	1392,0–1434,4	0,029	40	0,005	17	43	1,4825
	piaskowiec ⁵	1444,6–1455,2	0,023	42	0,007	32	77	1,4804
	mułowiec ¹	1491,3–1512,4	0,029	39	0,005	16	42	1,4805
	iłowiec marglisty ⁶	1546,7	0,012	41	0,002	20	49	1,4872
	mułow. ¹ , wap. ² , piask. ⁵	1699,1–1789,0	0,012	36	0,003	22	61	1,4795
	piaskowiec ⁵	1830,4	0,079	34	0,003	4	11	1,4832
Jura	mułowiec ¹	1863,0–1921,6	0,055	20	0,004	7	33	1,4895
	mułowiec ¹	1975,3	0,026	69	0,011	41	60	1,4730
	iłowiec ³	1987,0	0,028	41	0,004	15	36	1,4920
	mułowiec ¹	2006,6	0,021	37	0,002	9	23	1,4878
	margiel ⁷	2021,6	0,015	33	0,002	10	30	–
	piaskowiec ⁵	2035,4–2047,1	0,015	20	0,001	9	45	1,4823
	iłowiec ³	2052,1	0,135	20	0,004	3	14	1,4928
	mułowiec ¹	2065,5–2084,5	0,055	24	0,004	14	32	1,4929
	iłowiec ³	2091,2	0,084	23	0,006	7	31	–
	mułowiec ¹	2102,3–2106,8	0,052	26	0,005	10	38	1,4861
Kreda	piaskowiec ⁵	2111,2	0,034	31	0,005	16	50	1,4843
	piaskowiec ⁵	2123,8	0,024	20	0,002	8	32	1,4856

Tabela 12

Zawartość węgla organicznego oraz współczynnik migracji utworów kredy i jury
Organic carbon content and migration coefficient of Jurassic and Cretaceous rocks

Chronostratygrafia Chronostratigraphy		Głębokość Depth [m]	Węglowodory Hydrocarbons	C _{org} [%]	Węglow./C _{org} Hydroc./C _{org}
Kreda	górna	1261,3	0,006	0,21	0,029
		1277,0	0,003	0,11	0,027
	dolna	1355,8	0,009	1,39	0,006
		1392,0–1434,4	0,005	1,60	0,003
		1444,6–1455,2	0,007	0,33	0,021
		1491,3–1512,4	0,005	2,22	0,002
		1546,7	0,002	0,56	0,004
Jura	górna	1699,1–1789,0	0,003	0,47	0,006
		1830,4	0,003	0,39	0,007
		1863,0–1921,6	0,004	1,44	0,002
	środkowa	1975,3	0,011	0,49	0,022
		1987,0	0,004	1,84	0,002
		2006,6	0,002	1,95	0,001
		2021,6	0,002	0,35	0,006
		2035,4–2047,1	0,001	2,86	0,001
		2065,4–2084,2	0,004	1,70	0,002
		2091,3	0,006	2,80	0,002
		2102,8–2106,2	0,005	1,47	0,003
		2111,2	0,005	1,45	0,003
		2123,8	0,002	0,44	0,004

C_{org} – węgiel organiczny / organic carbon

skały. Węglowodory z próbki piaskowca z głęb. 1830,4 m (oksford środkowy i dolny) stanowią z kolei jedynie 4% wag. ekstraktu bitumicznego i mają wyraźnie naftenowy charakter, a przebieg krzywych absorpcji w podczerwieni frakcji olejowej tej próbki jest całkowicie odmienny niż w próbkach sąsiadujących. Podobnie w pozostałych przebadanych punktach zarówno ilość węglowodorów w ekstrakcie, jak ich ogólna charakterystyka chemiczna są bardzo różne. To samo można stwierdzić odnośnie stopnia zaawansowania przemian substancji bitumicznej określonego na podstawie składu bituminów i przebiegu krzywych absorpcji w podczerwieni dla olejów.

Ponieważ poszczególne próbki pochodzą z różnych pięter stratygraficznych, nasuwa się wniosek, że węglowodory jury górnej są syngenetyczne z osadem, a ich różnorodność uwarunkowana została bądź odmiennym wyjściowym materiałem organicznym, bądź też różnymi warunkami jego przemian.

Kreda dolna

Utwory kredy dolnej, o miąższości ok. 279,5 m (1280,5–1560,0 m), zawierają w spagu iłowce, mułowce i margle (berias oraz walanżyn dolny), powyżej zaś zalegają piaskowce przewarstwione mułowcami i iłowcami (walanżyn dolny

i górny). Zawartość substancji organicznej w utworach ilastych i mułowcowych wynosi od 0,56 do 2,22% wag., w piaskowcach 0,33–1,60% wag. Ilości bituminów w osadach kredy dolnej nie podlegają większym wahaniom i mieszczą się w przedziale 0,012–0,030% wag.

Węglowodory występują w tych skałach w niewielkich ilościach (0,001–0,009% wag.). Zawartość ich w ekstrakcie bitumicznym w najniższych warstwach iłowców wynosi 20%. Charakterystyczny jest wzrost do 32% wag. węglowodorów w bituminach pochodzących z nadległych warstw piaskowców, przy czym parafinowo-naftenowy charakter tych węglowodorów jest identyczny z typem węglowodorów niżej zalegających mułowców. Także przebieg krzywych absorpcji w podczerwieni niewęglowodorowej części olejów w obu tych warstwach wykazuje duże analogie.

W wyżej zalegających próbkach piaskowców aptu węglowodory stanowią tylko 6% wag. ekstraktu bitumicznego, są różne od próbek sąsiadujących, a poziom absorpcji w podczerwieni olejów wykazuje bardzo niski poziom zaawansowania przemian. Piaskowiec ten poza tym charakteryzuje się niską porowatością efektywną (14,4%).

Iłowce tworzące najwyższe warstwy kredy dolnej (apt), zawierają niewielkie (0,009% wag. w skale, 31% wag. w bituminach) ilości węglowodorów typu naftenowego.

Na podstawie przedstawionych obserwacji można przyjąć za prawdopodobne, że istnieje powiązanie genetyczne między węglowodorami mułowców i piaskowców walanżynu dolnego. Wobec dużej porowatości piaskowców nasuwa się wniosek o migracji pionowej węglowodorów z osadów mułowcowych. Wniosek ten nie znajduje jednak potwierdzenia w oznaczonym współczynniku migracji.

Węglowodory pozostałych próbek z kredy dolnej mają charakter syngenetyczny.

Kreda górna

Przebadano dwie próbki skał (cenomanu) leżących bezpośrednio nad utworami kredy dolnej. Są to próbki wapienia

i mułowca, obie zawierające małe ilości substancji organicznej, bituminów i węglowodorów. Udział węglowodorów w substancji bitumicznej jest niski (17 i 18 % wag.), a przeważają w nich wyraźnie węglowodory parafinowe. Różnią się one tym zdecydowanie od naftenowych i parafinowo-naftenowych węglowodorów kredy dolnej.

Mała ilość węglowodorów w ekstrakcie i przebieg absorpcji w podczerwieni olejów wskazują na niski stopień zaawansowania przemian bituminów w ropę naftową.

Wyniki badań ilości i charakteru chemicznego węglowodorów jury i kredy w wierceniu Oświno IG 1 pozwalają przypuszczać, że bituminy są tu w przeważającej mierze syngenetyczne z osadami, a ogólny stopień zmetamorfizowania bituminów jest bardzo niski.

BADANIA GEOCHEMICZNE MATERII ORGANICZNEJ METODĄ ROCK-EVAL

Wyniki analizy pirolitycznej Rock-Eval wybranych próbek dostarczyły szereg parametrów i wskaźników, których wartości podane zostały w tabeli 13. Interpretację przeprowadzono na podstawie wartości otrzymanych wyników, a także za pomocą powszechnie stosowanych metod graficznych przedstawionych na figurze 14. Badaniom geochemicznym materii organicznej metodą Rock-Eval poddane zostały wyłącznie próbki z utworów jury. Badania składu grupowego materii organicznej oraz poziomu adsorpcji węglowodorów wykazały duże zróżnicowanie charakteru bituminów między poszczególnymi piętrami stratygraficznymi, dlatego w tej części rozdziału wyniki badań metodą Rock-Eval skały jury zinterpretowano kolektywnie.

Potencjał węglowodorowy

Jednym z podstawowych wskaźników określających jakość skały macierzystej jest całkowita zawartość węgla organicznego (TOC). Zawartość TOC przebadanych próbek waha się między 0,14 a 17,03% wag., przy czym wartości powyżej 4% wag. stwierdzono jedynie w próbkach bajosu i aalenu (z głęb. 2127,9; 2132,3; 2162,0; 2183,2 i 2184,0 m). Większość pozostałych próbek zawiera w swoim składzie 1–3% wag. całkowitego węgla organicznego. Otrzymane wartości TOC odpowiadają szerokiemu zakresowi, pomiędzy słabym a doskonałym potencjałem węglowodorowym. Wartości parametru S1, określającego zawartość wolnych węglowodorów w skale, oscylują między 0,03 a 1,26 mgHC/gSkały, zaś węglowodory generowane w wyniku pirolizy, mierzone parametrem S2, przyjmują dla badanych próbek wartości 0,10–60,60 mgHC/gSkały. Wartości stosunku S1/S2 (0,02–0,30) oraz stosunku S1/TOC (0,01–0,21) zdecydowanie poniżej jedności sugerują autochtoniczny charakter zawartych w skale bituminów, pozostając w zgodzie z wartościami współczynnika migracji policzonymi dla próbek jury środkowej i górnej na podstawie składu grupowego materii organicznej.

Zgodnie z literaturą (Peters, 1986; Dembicki, 2017), wartości parametrów S1 i S2 wskazują na to, że niemal wszystkie przebadane próbki skalne mają niski potencjał węglowodo-

rowy. Wyjątek stanowi część próbek bajosu dolnego i allenu, które charakteryzują się wartościami wskaźników S2 typowymi dla skał macierzystych o średnim (próbka z głęb. 2141,2 m), dobrym (próbka z głęb. 2183,2 m), bardzo dobrym (próbka z głęb. 2184,0 m) i doskonałym (próbka z głęb. 2162,0 m) potencjale węglowodorowym. Wysokie ilości węglowodorów wygenerowanych w trakcie krakingu kerogenu (S2) nie idą w parze z wysoką zawartością wolnych węglowodorów (S1) w tych próbkach, co jest charakterystyczne dla niedojrzałych skał macierzystych.

Ocena potencjału węglowodorowego skały macierzystej opiera się nie tylko na interpretacji orientacyjnych wartości granicznych parametrów i wskaźników, lecz przede wszystkim na zależności między nimi. W praktyce geochemicznej, rutynowo wykorzystywaną metodą oceny jakościowej skały macierzystej jest korelacja wartości parametru S2 z wartościami wskaźnika TOC. Biorąc pod uwagę wartości omawianych parametrów i wskaźników oraz lokalizację próbek na diagramie zależności S2 vs. TOC (fig. 14a), większość omawianych próbek, mimo stosunkowo wysokich zawartości TOC, wskazują na skały o niskim potencjale węglowodorowym. Nieco wyższym, średnim potencjałem węglowodorowym, mogą cechować się próbki bajosu dolnego i aalenu z głęb. 2141,2; 2165,9 i 2196,5 m. Dobrym potencjałem węglowodorowym odznacza się próbka z głęb. 2183,2 m, bardzo dobrym z głęb. 2183,5 m, a doskonałym z głęb. 2162,0 m. Próbka z głęb. 2184,0 m charakteryzuje się bardzo dobrym potencjałem węglowodorowym.

Typ kerogenu

Kerogen to metastabilny, wysokomolekularny polikondensat związków organicznych, z którego, wraz ze wzrostem głębokości pogrzebania i temperatury, mogą być generowane bituminy. Na podstawie składu i źródła rozproszonej materii organicznej, środowiska depozycji oraz rodzaju generowanych węglowodorów wyróżnia się cztery główne typy kerogenu (np. Killops, Killops, 2005). Interpretacja typu kerogenu na podstawie wyników analizy pirolitycznej Rock-Eval odbywa się za pomocą licznych metod graficz-

Tabela 13
Zestawienie parametrów i wskaźników analizy Rock-Eval ze skal macierzystych jury
Rock-Eval pyrolysis parameters of Jurassic source rocks

Chronostratygrafia Chronostratigraphy	Głębokość Depth [m]	S1	S2	S3	T_{max} [°C]	HI [mg HC/gTOC]	OI [mg CO ₂ /gTOC]	PI [mgHC/gSkały]	TOC	RC	PC	MinC	SI/S2	SI/TOC
		[mg HC/gSkały]		[mg CO ₂ /gSkały]	[%]	[% wag]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Jura	górna	oksford	średkowy i górny	1915,4	434	45	51	0,05	1,74	1,64	0,1	0,74	0,05	0,02
				1918,7	430	43	51	0,04	2,93	2,77	0,16	0,4	0,04	0,02
				1922,9	431	46	53	0,08	2,12	1,99	0,13	0,49	0,08	0,04
				1925,2	431	42	57	0,08	2	1,89	0,11	0,71	0,08	0,04
	średkowy	kelowej	średkowy I górny	1933,0	432	46	40	0,05	3,14	2,97	0,17	0,56	0,06	0,03
				1937,6	434	45	54	0,09	2,21	2,07	0,14	1,5	0,10	0,05
				1941,5	424	43	78	0,18	1,15	1,07	0,08	0,58	0,22	0,10
				1944,5	431	47	57	0,12	1,88	1,76	0,12	0,66	0,14	0,06
	dolny	baton	średkowy	1950,5	428	47	96	0,22	0,95	0,88	0,07	0,62	0,29	0,14
				1956,7	428	64	112	0,10	0,71	0,64	0,07	0,65	0,11	0,07
				1961,1	429	67	138	0,19	0,65	0,57	0,08	1,33	0,23	0,15
				1969,4	428	65	98	0,14	1,15	1,04	0,11	0,8	0,16	0,10
	bajos	średkowa	średkowy	1977,7	426	72	137	0,15	0,66	0,58	0,08	0,59	0,17	0,12
				1983,0	428	46	45	0,15	1,94	1,82	0,12	0,14	0,18	0,08
				1983,6	429	45	55	0,09	1,44	1,35	0,09	0,45	0,09	0,04
				1996,3	430	47	46	0,07	2,23	2,1	0,13	0,23	0,08	0,04
dolny		średkowy	2002,6	433	55	261	0,12	0,97	0,84	0,13	2,48	0,13	0,07	
			2003,7	435	74	216	0,23	0,14	0,12	0,02	0,49	0,30	0,21	
			2016,0	413	16	41	0,20	2,49	2,39	0,10	0,17	0,24	0,04	
			2036,4	422	19	40	0,07	2,01	1,93	0,08	0,16	0,08	0,01	

Jura	środkowa		bajos	górnny	2127,9	0,11	2,32	2,34	418	25	26	0,05	9,13	8,81	0,32	1,09	0,05	0,01
					2132,3	0,12	2,36	1,61	425	38	26	0,05	6,19	5,92	0,27	0,76	0,05	0,02
aalen-bajos dolny			2141,2	0,19	5,10	0,55	430	120	13	0,04	4,24	3,78	0,46	0,06	0,04	0,04		
			2159,9	0,10	2,00	0,29	431	169	25	0,05	1,18	0,99	0,19	0,03	0,05	0,08		
			2162,0	1,26	60,60	8,55	429	356	50	0,02	17,03	11,49	5,54	12,40	0,02	0,07		
			2165,9	0,09	3,02	0,65	434	103	22	0,03	2,93	2,64	0,29	0,08	0,03	0,03		
			2183,2	0,27	9,48	1,39	431	104	15	0,03	9,11	8,22	0,89	0,83	0,03	0,03		
			2184,0	0,30	10,41	1,77	428	117	20	0,03	8,86	7,88	0,98	1,21	0,03	0,03		
			2196,5	0,11	3,10	1,55	437	83	42	0,03	3,72	3,39	0,33	0,08	0,04	0,03		
			2198,8	0,05	0,31	1,14	432	74	270	0,14	0,42	0,36	0,06	0,14	0,16	0,12		
		2207,5	0,04	0,44	0,61	428	61	85	0,08	0,72	0,66	0,06	0,05	0,09	0,06			

HI – wolne węglowodory / free hydrocarbons; S2 – węglowodory generowane w trakcie pirolizy / oil potential; S3 – CO₂ związane z materią organiczną / CO₂ organic source;

T_{max} – temperatura maksymalnego generowania węglodorów / temperature of maximum hydrocarbon generation; HI – wskaźnik wodorowy / Hydrogen Index; OI – wskaźnik tlenowy / Oxygen Index;

PI – indeks produktywności / Production Index; TOC – całkowita zawartość węgla organicznego / total organic carbon; RC – węgiel organiczny rezydualny / residual organic carbon;

OC – węgiel organiczny podatny na proces pirolizy / pyrolysisable organic carbon; MinC – węgiel mineralny / mineral carbon

SI – wolne węglowodory / free hydrocarbons; S2 – węglowodory generowane w trakcie pirolizy / oil potential; S3 – CO₂ związane z materią organiczną / CO₂ organic source;
T_{max} – temperatura maksymalnego generowania węglowodorów / temperature of maximum hydrocarbon generation; HI – wskaźnik wodorowy / Hydrogen Index; OI – wskaźnik tlenowy / Oxygen Index;
PI – indeks produktywności / Production Index; TOC – całkowita zawartość węgla organicznego / total organic carbon; RC – węgiel organiczny rezydualny / residual organic carbon;
PC – węgiel organiczny podatny na proces pirolizy / pyrolysable organic carbon; MinC – węgiel mineralny / mineral carbon

nych. Zmodyfikowany diagram Van Krevelena (HI vs. OI) oraz wykres zależności HI vs. T_{max} to najpowszechniej stosowane wykresy do oceny rodzaju zachowanej w skale materii organicznej. Poza metodami graficznymi, wyznacznikiem typu kerogenu są też wartości wskaźnika wodorowego (HI) i wskaźnika tlenowego (OI).

Przebadane próbki charakteryzują się wartościami HI, w zakresie 14–356 mgHC/gTOC, oraz wartościami OI 13–270 mgCO₂/gTOC. Z przedstawionych wartości wynika, że przebadane skały mogą stanowić co najwyżej skały macierzyste dla węglowodorów gazowych – kerogen typu III i/lub IV. Jedyną próbką przejawiającą cechy skały roponośnej jest ta z głęb. 2162,0 m (Dembicki, 2017).

Lokalizacja punktów na diagramie klasyfikacyjnym HI vs. T_{max} (fig. 14b) oraz na zmodyfikowanym diagramie Van Krevelena (HI vs. OI, fig. 14c) pozostaje w zgodzie z powyższą interpretacją surowych wartości parametrów Rock-Eval. Zarówno na diagramie klasyfikacyjnym HI vs. T_{max}, jak i HI vs. OI próbka z głęb. 2162,0 m (bajos dolny i aalen) znajduje się w polu typowym dla roponośnych skał typu II, który najczęściej powstaje z morskiej lub mieszanej morskiej i lądowej materii organicznej (Killops, Killops, 2005; Dembicki, 2017). Oba diagramy typują kerogen zawarty w próbce z głęb. 2159,9 m (bajos dolny i aalen) jako typ III. Typowym źródłem kerogenu typu III jest materia pochodząca ze szczątków roślin naczyniowych, które w miarę dojrzewania przeobrażają się w kerogen zdolny do generacji węglowodorów gazowych (Killops, Killops, 2005; Dembicki, 2017). Na kerogen typu III w próbkach bajosu dolnego i aalenu z głęb. 2141,2; 2165,9; 2183,2 i 2184,0 m wskazuje usytuowanie tych próbek na diagramie klasyfikacyjnym HI vs. OI. Na diagramie HI vs. T_{max} próbki te zlokalizowane są w obrębie pola charakterystycznego dla IV typu kerogenu, jednak zbliżone są dość blisko granicy pola kerogenu typu IV z polem kerogenu typu III. Przy wysokiej zawartości TOC w tych próbkach (2,93–9,11% wag. skały) możliwym wyjaśnieniem różnicy w klasyfikacji jest efekt mieszania kerogenu typu III z kerogenem typu IV oraz różna dla użytych diagramów czułość na domieszki kerogenów. Wymienione próbki zawierają zatem najprawdopodobniej w swoim składzie mieszany, III/IV typ kerogenu. Uwzględniając lokalizację wyników na diagramach klasyfikacyjnych oraz surowe wartości omówionych wskaźników, pozostałe próbki bajosu dolnego i aalenu, a także wszystkie młodsze próbki jury zawierają w swoim składzie kerogen typu IV, który powstał z utlenionej lub w inny sposób przetworzonej materii organicznej różnego pochodzenia.

Stwierdzono, że z wyjątkiem części skał aalenu i bajosu dolnego, przebadane skały jury z otworu Oświno IG 1 są jałowe lub posiadają zdolność generowania niewielkich ilości gazu. W wyższych horyzontach bajosu dolnego i aalenu mogą znajdować się dobre jakościowo skały macierzyste dla węglowodorów gazowych (próbka z głęb. 2159,9 m) i ciepłych (próbka z głęb. 2162,0 m).

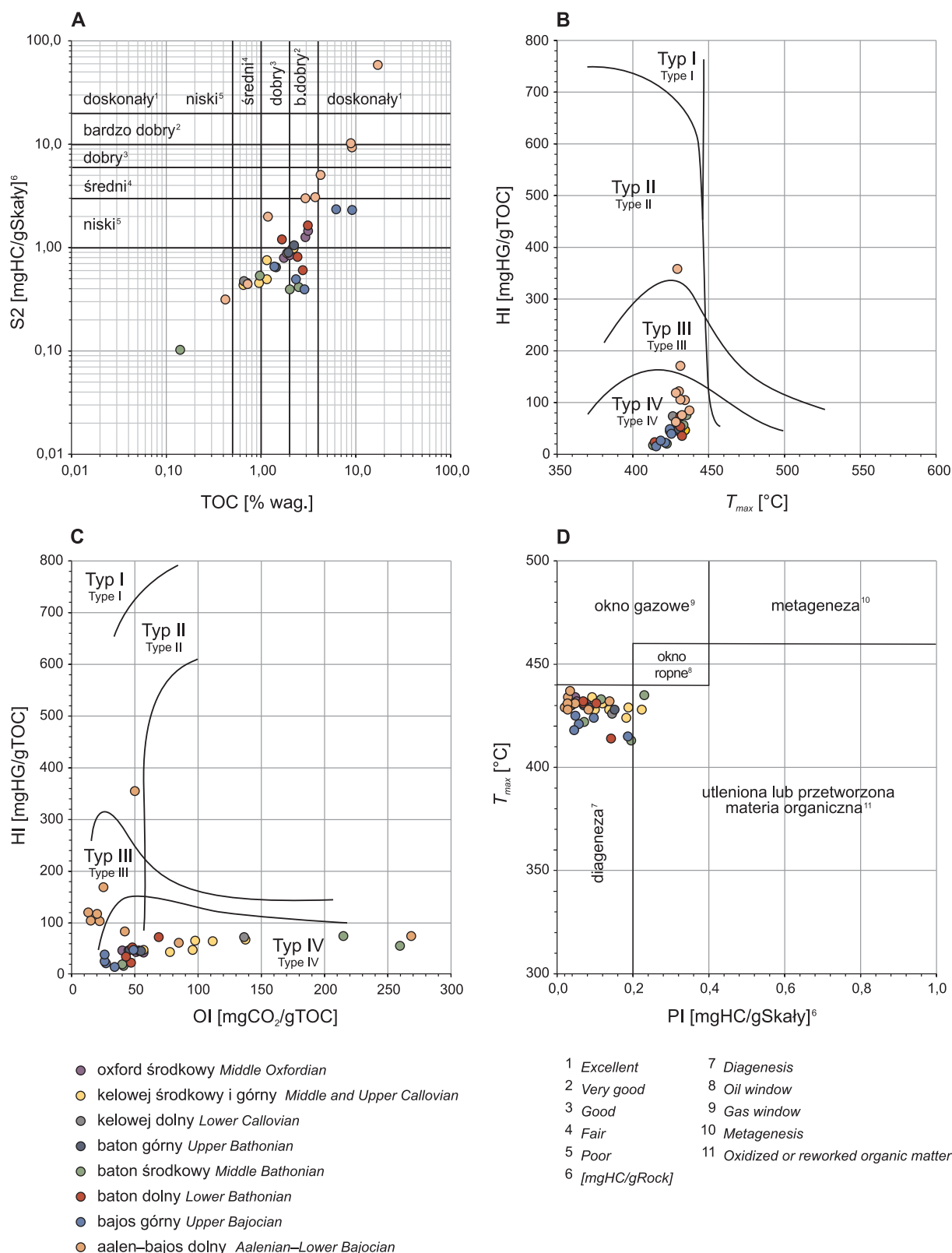


Fig. 14. Diagram zależności parametrów a) S2 vs. TOC do interpretacji potencjału węglowodorowego skał macierzystych; b) HI vs. T_{max} do interpretacji typu kerogenu; c) HI vs. OI (zmodyfikowany diagram Van-Krevelena) do interpretacji typu kerogenu; d) T_{max} vs. PI do interpretacji dojrzałości termicznej dla wszystkich przeprowadzonych analiz (wg Dembickiego, 2017)

A cross-plot of a) S2 vs. TOC for interpretation of source rock hydrocarbon potential; a) HI vs. T_{max} for kerogen typing; b) HI vs. OI (modified Van-Krevelen diagram) for kerogen typing; c) T_{max} vs. PI for thermal maturity interpretation of all interpreted analysis results (after Dembicki, 2017)

Dojrzałość termiczna

Temperatura maksymalnego generowania węglowodorów, pod postacią parametru T_{max} , to podstawowy wskaźnik Rock-Eval stosowany do oceny dojrzałości termicznej badanego kerogenu. Zakres otrzymanych wartości T_{max} dla przebadanych próbek wynosi między 413 a 437°C, wskazując na niską dojrzałość badanego kerogenu (Dembicki, 2017).

Indeks produktywności (PI) stanowi wskaźnik, który reprezentuje ilość wygenerowanych ze skały węglowodorów względem całkowitej ilości węglowodorów, które mogły zostać wygenerowane ze skały. Wartość tego parametru wzrasta wraz ze wzrastającym stopniem dojrzałości termicznej kerogenu (Dembicki, 2017). Indeks produktywności w prze-

badanych próbkach otworów nie przekracza wartości 0,23, pozostając w zgodzie ze wskazaniami parametru T_{max} .

Figura 14d przedstawia diagram zależności T_{max} vs. PI, na którym widoczne jest bliskie usytuowanie przebadanych próbek, sugerując, że przebadane skały uległy podobnemu działaniu temperatury. Większość próbek znajduje się na polu typowym dla skał o niskiej dojrzałości termicznej. Pozostałe próbki (z głęb. 2003,7 m oraz 1950,5 m) plasują się w obrębie pola dla utlenionej lub w inny sposób przetworzonej materii organicznej, co pozostaje w zgodzie z interpretacją typu kerogenu tych skał (IV typ).

Wyniki analizy Rock-Eval jednoznacznie wskazują na niską dojrzałość termiczną badanych skał, co koreluje się z omawianymi wcześniej wynikami badań składu grupowego materii organicznej oraz poziomu absorpcji węglowodorów.

Łukasz SMAJDOR

ANALIZA TEMPY DEPOZYCJI ORAZ WARUNKÓW POGRZEBANIA

METODY BADAŃ

Dla otworu wiertniczego Oświno IG1 przeprowadzono analizę tempa depozycji oraz warunków pogrzebania. Modelowanie przeprowadzono za pomocą oprogramowania PetroMod™ firmy Schlumberger używając do tego modułu 1D (jednowymiarowego). Niestety brak informacji dotyczących termiki (dane R_o) nie pozwolił na stworzenie modelu historii termicznej, metodą *forward modelling*. Metoda ta zakłada stan wyjściowy – obecny (*present day*), dla którego posiadamy pomierzone parametry – temperaturę w otworze oraz dane refleksyjności witrynytu (R_o), a następnie za pomocą dobierania parametrów – przeszłych (*past*) – erozji (dla R_o) oraz strumienia ciepłego (*heat flow* – dla temperatury) – stara się metodą iteracyjną dopasować dane modelowane do danych pomierzonych. Z powodu braku ww. danych skupiono się na analizie tempa depozycji oraz warunków pogrzebania. Analizę przeprowadzono na podstawie następujących danych: stratygrafii, litologii, miąższości jednostek wydzielonych w profilu. Każdej jednostce straty-

graficznej przypisany został wiek na podstawie najnowszej tabeli stratygraficznej Międzynarodowej Komisji ds. Stratygrafii (*International Commission on Stratigraphy (ICS)* Cohen i in. 2013, <http://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2020-01.pdf>). Wartości te zgodne są z biblioteką programu PetroMod™. W procedurze analizy tempa depozycji oraz warunków pogrzebania rekonstruowano miąższości zerodowanych fragmentów profilu litostratygraficznych. Dotyczyło to utworów kredy. Miąższość zerodowanych utworów określono na podstawie analiz przedstawionych w pracach Jaskowiak-Schoeneichowej i in. (1986), Gaździckiej (1998) oraz Marka i in. (1983–85). Dodatkowo potrzebne było ustalenie warunków granicznych takich jak: głębokość wody w odpowiednich okresach geologicznych oraz zmiany średniej temperatury powierzchniowej w historii geologicznej basenu [ustalane automatycznie z biblioteki programu za Wygrala (1989)]. Parametr zmiany strumienia ciepłego został pominięty, co zostało opisane powyżej.

WYNIKI

Analiza Tempa Depozycji

Najstarszymi utworami w profilu otworu Oświno IG1 są klastyczne utwory toarku górnego (jura dolna). Ze względu na to, że utwory te nie zostały w całości przewiercone, niemożliwe jest ustalenie w miarę wiarygodnego ich tempa depozycji. Bezpośrednio na nich zalegają utwory aalenu–bajosu dolnego (J2aa–bj1) o miąższości 79 m, przykryte utworami bajosu górnego (J2bj3) o miąższości 48 m. Ich tempo depozycji szacowane jest na ~15 m/mln lat (fig. 15). Utwory bajosu przykryte są utworami batonu w pełnym wykształceniu. Najbardziej miąższe – 50 m – są utwory batonu dolnego, które przykryte są 37 m batonu środkowego, na którym zalega 25 m batonu górnego. Spadek miąższości osadów świadczy

o spadku tempa depozycji, które, zakładając mniej więcej równe okresy przypadające na baton dolny, środkowy i górny, szacowane jest na ~125 m/mln lat, ~41 m/mln lat oraz ~21 m/mln lat. Podobny trend wykazują leżące wyżej osady keloweju, gdzie szacowane tempo depozycji dla keloweju dolnego to ~60 m/mln lat, a keloweju środkowego i górnego na ~21 m/mln lat. Podobny trend wykazują osady jury górnej – oksfordu (~69 m/mln lat – J3o2_o1, ~12 m/mln lat – J3o3) oraz kimerydu (~22 m/mln lat – J3km1, ~7 m/mln lat – J3km3). Odwrócenie tego trendu następuje dopiero w tytonie, gdzie w tytonie dolnym tempo depozycji szacowane jest na ~1 m/mln lat i wzrasta w tytonie górnym do ~24 m/mln lat.

Podobny trend ma miejsce w kredzie dolnej, gdzie pulsacyjny charakter otwierania się basenu i zapełniania prze-

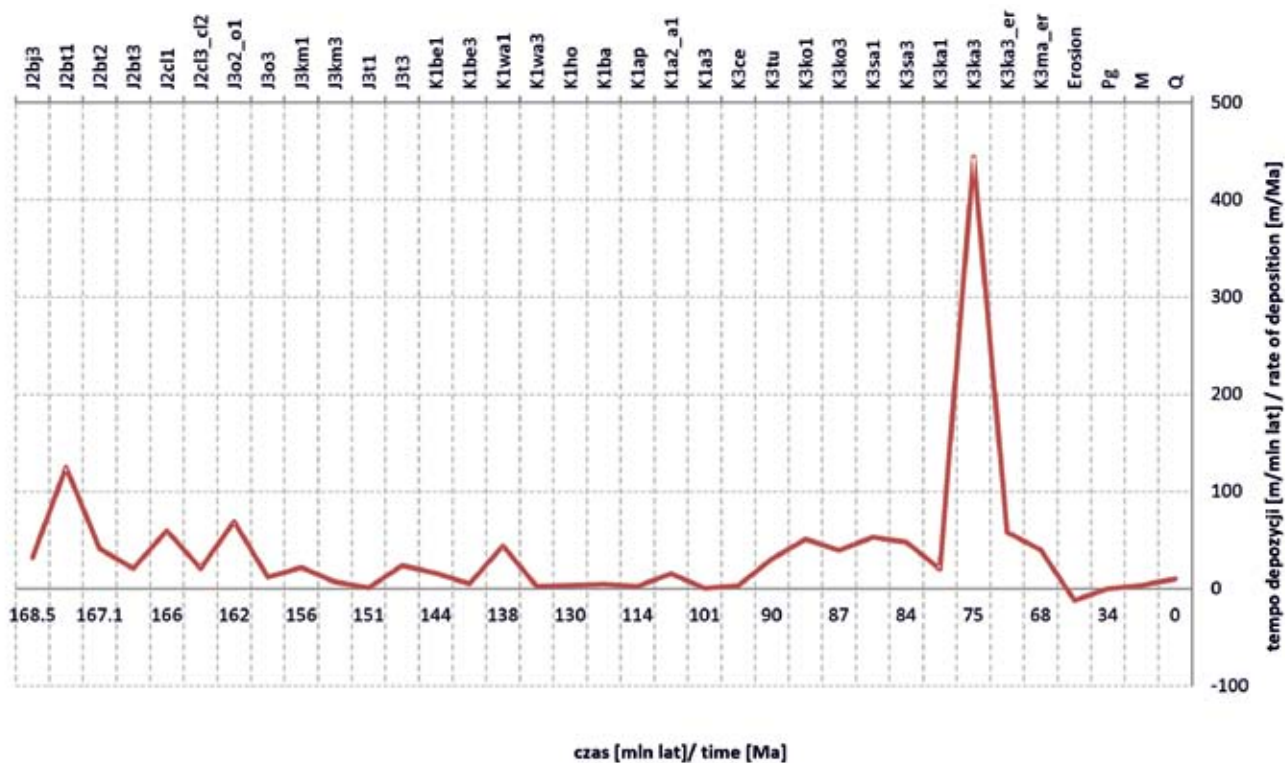


Fig. 15. Tempo depozycji osadów

Q – czwartorzęd; M – miocen; Pg – paleogen; **kreda górna**: K3ma_er – mastrycht – erozja; K3ka3_er – kampan górny – erozja; K3ka3 – kampan górny; K3ka1 – kampan dolny; K3sa3 – santon górny; K3sa1 – santon dolny; K3ko3 – koniak górny; K3ko1 – koniak dolny; K3tu – turon; K3ce – cenoman; **kreda dolna**: K1a3 – alb górny; K1a2_a1 – alb środkowy-dolny; K1ap – apt; K1ba – barem; K1ho – hoteryw; K1wa3 – walanżyn górny; K1wa1 – walanżyn dolny; K1be3 – berias górny; K1be1 – berias środkowy-dolny; **jura górna**: J3t3 – tyton górny; J3t1 – tyton dolny; J3km3 – kimeryd górny; J3km1 – kimeryd dolny; J3o3 – oksford górny; J3o2_o1 – oksford środkowy-dolny; **jura środkowa**: J2cl3_cl2 – kelowej górny-środkowy; J2cl1 – kelowej dolny; J2bt3 – baton górny; J2bt2 – baton środkowy; J2bt1 – baton dolny; J2bj3 – bajos górny; J2aa_bj1 – aalen-bajos dolny; **jura dolna**: J1to3 – toark górny

Rate of deposition

Q – Quarternary; M – Miocene; Pg – Paleogene; **Upper Cretaceous**: K3ma_er – Maastrichtian – erosion; K3ka3_er – Upper Campanian – erosion; K3ka3 – Upper Campanian; K3ka1 – Lower Campanian; K3sa3 – Upper Santonian; K3sa1 – Lower Santonian; K3ko3 – Upper Coniacian; K3ko1 – Lower Coniacian; K3tu – Turonian; K3ce – Cenomanian; **Lower Cretaceous**: K1a3 – Upper Albian; K1a2_a1 – Middle-Lower Albian; K1ap – Aptian; K1ba – Barremian; K1ho – Hauterivian; K1wa3 – Upper Valanginian; K1wa1 – Lower Valanginian; K1be3 – Upper Berriasian; K1be1 – Middle-Lower Berriasian; **Upper Jurassic**: J3t3 – Upper Tithonian; J3t1 – Lower Tithonian; J3km3 – Upper Kimmeridgian; J3km1 – Lower Kimmeridgian; J3o3 – Upper Oxfordian; J3o2_o1 – Middle-Lower Oxfordian; **Middle Jurassic**: J2cl3_cl2 – Upper-Middle Callovian; J2cl1 – Lower Callovian; J2bt3 – Upper Bathonian; J2bt2 – Middle Bathonian; J2bt1 – Lower Bathonian; J2bj3 – Upper Bajocian; J2aa_bj1 – Aalenian-Lower Bajocian; **Lower Jurassic**: J1to3 – Upper Toarcian

strzeni akomodacyjnej widoczny na wykresie pograżania odzwierciedla się w wartościach tempa depozycji, które kształtuje się następująco: berias dolny ~16 m/mln lat, berias górny ~5 m/mln lat, walanżyn dolny ~44 m/mln lat, walanżyn górny ~3 m/mln lat, hoteryw ~4 m/mln lat, barrem ~5 m/mln lat, apt ~3 m/mln lat oraz alb dolny i środkowy ~16 m/mln lat i górny ~0,5 m/mln lat.

Zmiana tempa pograżania basenu, a co za tym idzie tempa depozycji osadów następuje dopiero w kredzie górnej. W cenomanie tempo depozycji jest niskie ~3 m/mln lat,

jednak od turonu zaczyna rosnąć (turon ~30 m/mln lat, koniak ~50 m/mln lat, santon ~50 m/mln lat), aby w kampanie osiągnąć maksimum szacowane na ponad 400 m/mln lat (~444 m/mln lat). Tak gwałtowny skok tempa depozycji musiał być związany z bardzo gwałtowną ekstensją, która tuż po tym impulsie wyhamowuje (mastrycht ~40 m/mln lat przy założeniu paleodepozycji 200 m osadów).

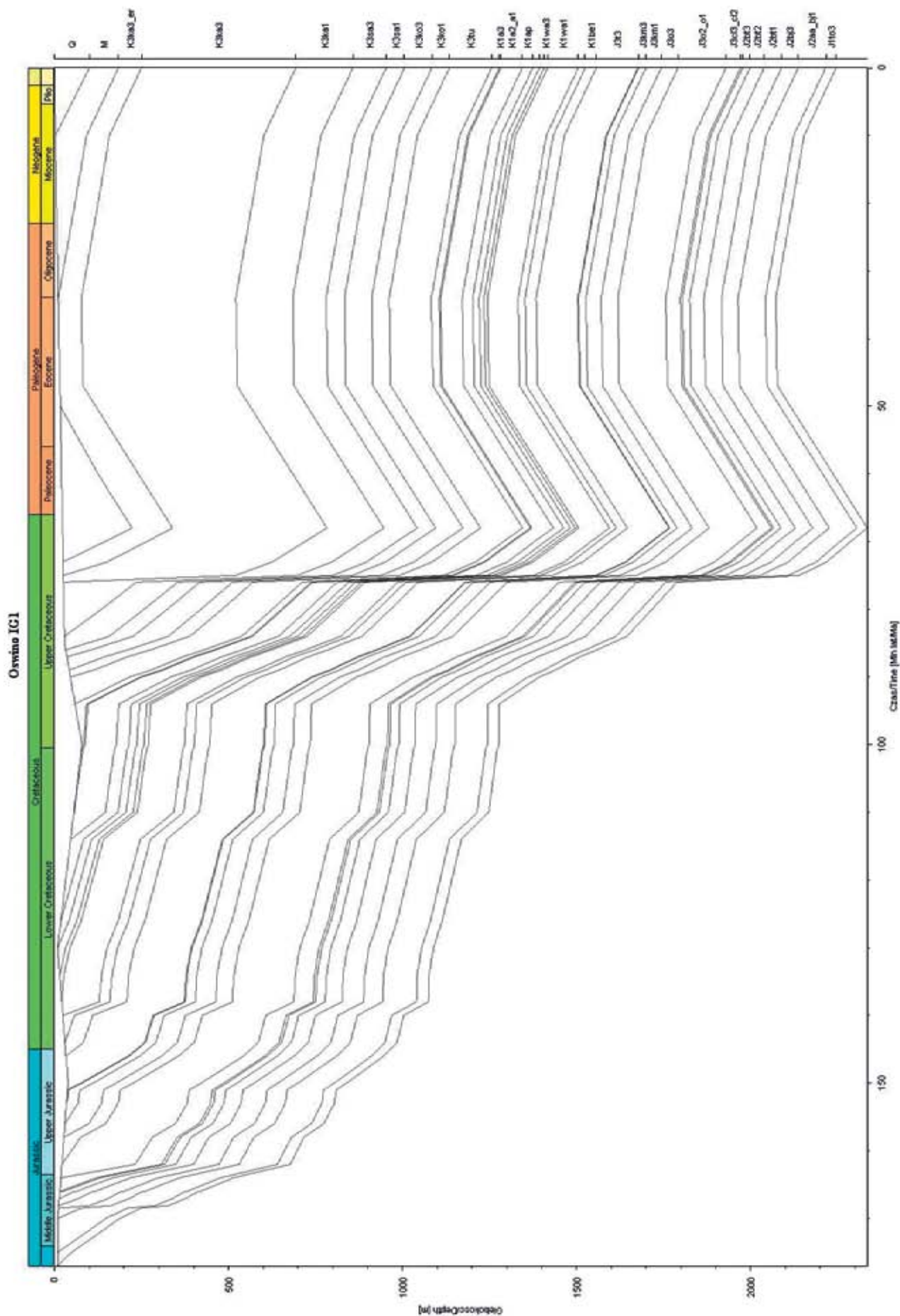
Następnie na przełomie kredy górnej i paleogenu następuje zmiana reżimu tektonicznego z ekstensyjnego na kompresyjny, powodujący erozję części osadów kampanu i pełnego

Fig. 16. Historia pogrzebania utworów

Objaśnienia symboli jak w figurze 15

Burial history plot

For explanations of symbols see Figure 15



profilu mastrychtu. W połowie miocenu następuje ponowna ekstensja, w czasie której tempo depozycji osadów osiągnęło ~4 m/mln lat, przyspieszając ostatecznie do ~10 m/mln lat w czwartorzędzie.

Modelowanie warunków pogrzebania

Dla profilu Oświno IG 1 wykonano jednowymiarowe modelowania i rekonstrukcję warunków pogrzebania (fig. 16). Miąższości erozyjnie usuniętych utworów kredy przyjęto za: Marek i in. (1983–85), Jaškowiak-Schoeneichowa i in. (1986) oraz Gaździcka (1998). Przyjęto erozję ~50 m kampanu oraz ~200 m mastrychtu, co daje łączną miąższość ~250 m zerodowanych osadów.

Model pograżania osadów dla otworu Oświno IG 1 rozpoczyna się we wczesnej jurze. Od początku tego okresu widoczny jest wzrost tempa pograżania osadów. Najbardziej gwałtowna faza pogrzebania miała miejsce we wczesnym ba-

tonie ale uległa zahamowaniu na przełomie keloweju i oksfordu, osiągając minimum na przełomie kimerydu i tytonu.

Okres kredy rozpoczyna się spokojniejszym tempem sedymentacji w stosunku do okresu jury. W tym okresie widać ogromną różnicę pomiędzy wczesną a późną kredą. Wczesna kreda to czas powolnego pograżania basenu, natomiast późna kreda, to okres, w którym miała miejsce najbardziej gwałtowna faza pogrzebania w całym profilu otworu. W tym okresie miąższość pokrywy osadowej wyniosła ~1400 m. Na przełomie kredy i paleogenu następuje zmiana reżimu tektonicznego z ekstensyjnego na kompresyjny i wypiętrzanie całego obszaru bruzdy śródpolskiej, który staje się wałem środkowopolskim (Dadlez i in., 1995).

W paleogenie ~50 m kampanu oraz całość osadów mastrychtu zostaje zerodowana.

Okres miocenu oraz czwartorzędu charakteryzuje się spokojnym tempem depozycji.