

Potencjał naftowy utworów dolomitu głównego w strefie Kamienia Pomorskiego. Część 2 — Analiza ropotwórczości

Paweł Kosakowski*, Waław Burzewski*, Maciej J. Kotarba*

Petroleum potential of the Main Dolomite strata of the Kamień Pomorski area (northern Poland). Part 2 — Petroleum generation and expulsion processes. *Prz. Geol.*, 51: 663–672.

Summary. The structural element of the Kamień Pomorski carbonate platform, separated from the Main Dolomite basin, is facially contoured with oil accumulations. For this reason the area was selected for a comparative analysis of hydrocarbon potential and the volume of accumulation. Hydrocarbon potential (2.5 to 8.8 kg HC/m³ of source rock) was calculated in relation to the thickness of the source rock by a numerical modelling method. On this basis the hydrocarbon potential was estimated. It ranges from 11 to 163 kg HC/m² in the structural area of the Main Dolomite strata of Kamień Pomorski carbonate platform. With such parameters, the oil system in the carbonate platform could be classified as normally charged basin, with 16% efficiency of hydrocarbon potential in the oil accumulations of Kamień Pomorski carbonate platform.

Key words: Main Dolomite, hydrocarbon potential, thermal evolution, modelling of hydrocarbon generation and expulsion, Kamień Pomorski carbonate platform

Analizę ropotwórczości dolomitu głównego w strefie Kamienia Pomorskiego wykonano metodą modelowań numerycznych. Metoda ta uzasadnia w sposób wymiarowany identyfikację wytworzonych faz węglowodorowych i ich ekspulsji z kwalifikowanych geochemicznie poziomów skał macierzystych, podlegających procesom pograżenia, zmianom temperatury i ciśnienia w czasie ewolucji basenu sedymentacyjnego. Powyższą analizę przeprowadzono w poprzecznym przekroju platformy węglanowej Kamienia Pomorskiego i jej bezpośredniego otoczenia w sześciu reprezentatywnych odwiertach Laska-2, Laska-1, Zastań-1, Kamień Pomorski-7, Wrzosowo-8 i Strzeżewo-1, (ryc. 1, 2). Otwory te zostały wyznaczone w oparciu o charakterystykę geochemiczną macierzystości utworów dolomitu głównego podaną w pierwszej części tego artykułu (Kotarba i in., 2003).

Udokumentowane zasoby ropy naftowej, w okonturowanej facjalnie i strukturalnie strefie zbioru akumulacyjnego utworów dolomitu głównego Kamienia Pomorskiego w zachodniopomorskiej części basenu cechsztyńskiego, uzasadniają jej wybór do analizy naftowej jako argumentu porównawczego wykorzystania ich potencjału węglowodorowego w wielkości akumulacji złożowej.

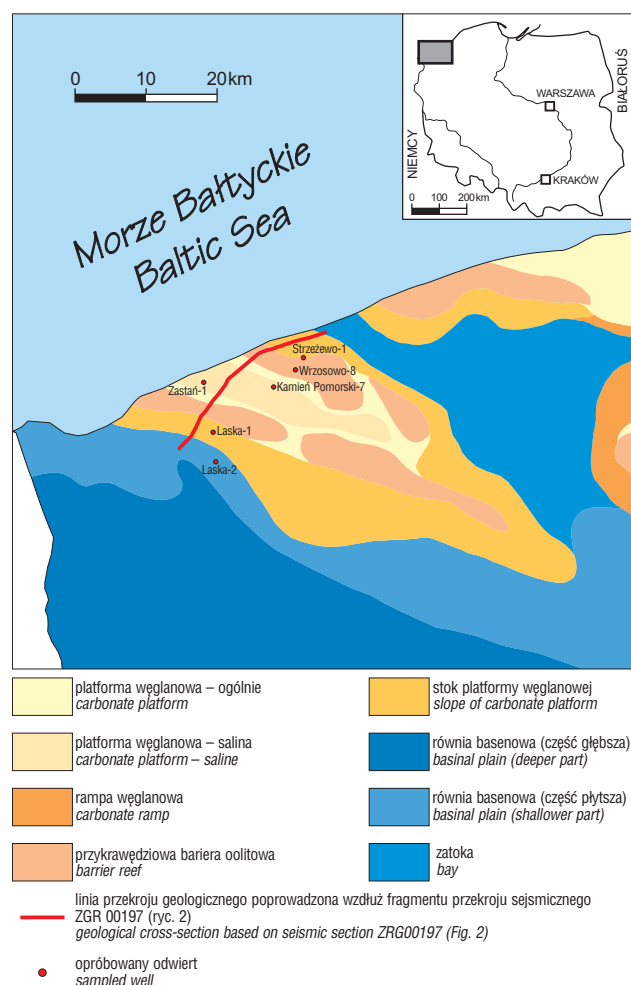
Metodyka modelowań numerycznych

Zintegrowana analiza procesów generowania i ekspulsji węglodorów, jako podstawa numerycznych modelowań, została szczegółowo przedstawiona w pracach Ungerera i in. (1990), Dore i in. (1993) i Weltego i in. (1997). Na tych zasadach został opracowany model koncepcyjny programu numerycznego BasinMod™, który zastosowano w niniejszej pracy.

Poszczególne elementy wykonawcze bloku programowego BasinMod™ rozwiązano według powszechnie stosowanych procedur, które dla celów niniejszej analizy są sprowadzone do następujących ustaleń:

1) wielkość kompaktacji wydzielonych litotypów skalnych w profilach stratygraficznych analizowanych odwiertów obliczono algorytmem Dykstry (1987),

2) przewodność cieplną szkieletu skalnego dla każdego kompleksu litostratygraficznego określono metodą Deminga i Chapmana (1989), a przy obliczeniu przepuszczalności



Ryc. 1. Mapa paleogeograficzna depozycji dolomitu głównego strefy Kamienia Pomorskiego (Wagner, 2000) z lokalizacją odwiertów dla których wykonano modelowania numeryczne

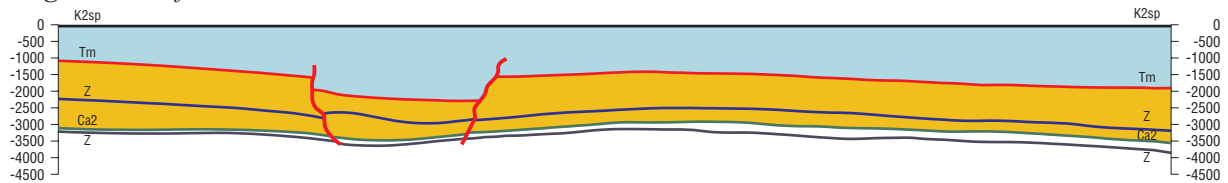
Fig. 1. Paleogeographic map of Zechstein Main Dolomite strata of Kamień Pomorski area (Wagner, 2000) with location of wells in which performed numerical modelling

*Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

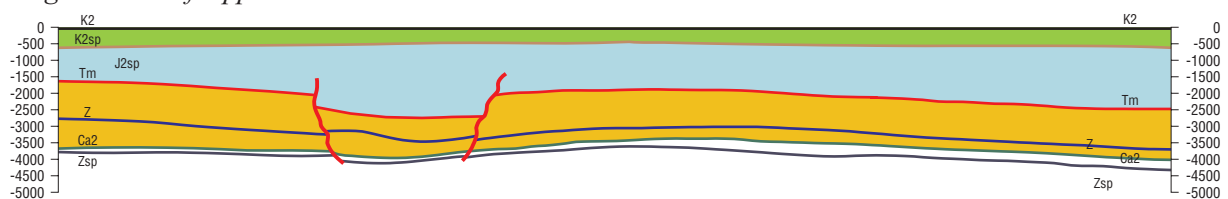
Etap I. Koniec sedimentacji wapienia muszlowego
Stage I. End of Muschelkalk sedimentation



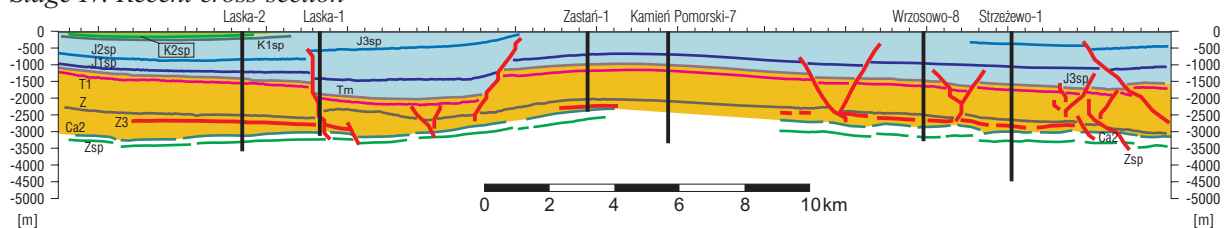
Etap II. Koniec sedimentacji dolnej kredy
Stage II. End of Lower Cretaceous sedimentation



Etap III. Koniec sedimentacji górnej kredy
Stage III. End of Upper Cretaceous sedimentation



Etap IV. Przekrój współczesny
Stage IV. Recent cross-section



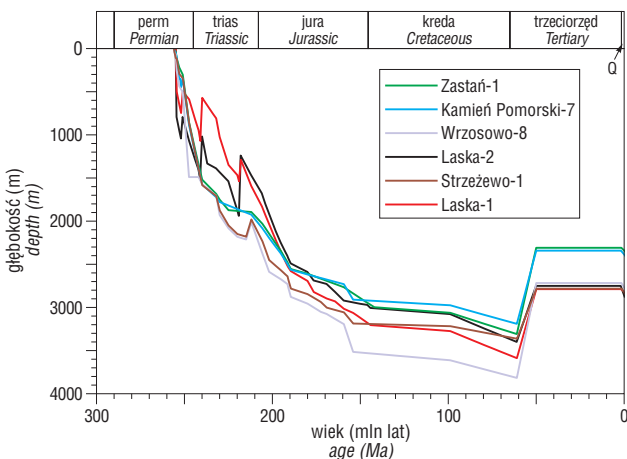
kompleks kredy górnej
 Upper Cretaceous strata

kompleks kreda dolna – trias środkowy
 Lower Cretaceous – Middle Triassic strata

kompleks trias środkowy – dolomit główny
 Middle Triassic – Zechstein Main Dolomite strata

Ryc. 2. Główne etapy rozwoju paleotektonicznego strefy Kamienia Pomorskiego z lokalizacją profili wierceni na współczesnym przekroju geologicznym. Rekonstrukcja paleotektoniczna wg Wagnera i in. (2002); K2 — strop kredy górnej, K2sp — spąg kredy górnej, K1sp — spąg kredy dolnej, J3sp — spąg jury górnej, J2sp — spąg jury środkowej, J1sp — spąg jury dolnej, Tm — strop wapienia muszlowego, T1 — strop dolnego pstręgo piaskowca, Z — strop cechsztynu, Z3 — strop cyklotemu Leine, mCa2 — strop dolomitu głównego, Zsp — spąg cechsztynu

Fig. 2. Main paleotectonic stages for Kamień Pomorski area with location of analyzed wells on recent geological cross-section. Paleotectonic reconstruction after Wagner et al. (2002); K2 — top of Upper Cretaceous, K2sp — bottom of Upper Cretaceous, K1sp — bottom of Lower Cretaceous, J3sp — bottom of Upper Jurassic, J2sp — bottom of Middle Jurassic, J1sp — bottom of Lower Jurassic, Tm — top of Muschelkalk, T1 — top of Lower Buntsandstein, Z — top of Zechstein, Z3 — top of Leine-series, Ca2 — top of Main Dolomite, Zsp — bottom of Zechstein



skala wykorzystano metodę Kozeny-Carmana (Doligez i in., 1986; Ungerer i in., 1990),

3) przepływ ciepła obliczono metodą stanu równowagi przejściowej zgodnie z algorytmem zastosowanym w tym programie (BasinMod™ Reference Manual, 1987),



Ryc. 3. Wykresy pograżania poziomu dolomitu głównego w analizowanych odwiertach strefy Kamienia Pomorskiego, według modelu termiczno-erozyjnego I (Poprawa, 2000)

Fig. 3. Burial history curves of Main Dolomite strata in wells on Kamień Pomorski area, according to thermal-erosion model I (Poprawa, 2000)

Tab. 1. Pomiary refleksyjności wityritu R_r wykorzystane do kalibracji modeli termiczno-erozyjnych (Grotek & Wagner, inf. ustna)

Table 1. Vitrinite reflectance R_r measurements used to calibration of thermal-erosion models (Grotek & M. Wagner, pers. comm.)

Odwiert Well	Stratygrafia Stratigraphy	Przedział opróbowania Sampling interval	R _r	Liczba próbek Number of samples
Brojce IG1	J2	65,0	0,27	1
	J1	409,0–1139,0	0,25–0,40	9
	PZ2	3247,0	0,92	1
	PZ1	3588,8	1,03	1
Czaplinek IG1	J1	355,0–360,5	0,34–0,39	2
	T3	745,0	0,43	1
	T2	1198,0	1,07	1
	T1	1476,3–1749,0	0,47–0,92	5
	PZ3	3081,0–3125,0	0,81–1,13	2
	PZ2	3633,3–3860,0	1,57–2,33	3
	PZ1	4077,8–4083,0	1,63–2,4	2
Czaplinek IG2	C1	5250,0	2,60	1
	T2	697,0	0,70	1
	T1	858,1	0,71	1
	PZ3	2804,9	1,54	1
	PZ2	2861,0–3199,0	0,76–1,55	3
Moracz IG1	PZ1	3457,5	1,62	1
	T3	1275,0	0,45	1
Wolin IG1	J2	551,0–662,1	0,46–0,47	2
	J1	852,0–1422,0	0,46–0,61	3
	T3	1502,0	0,61	1
	T1	2019,0	0,56	1
	T1	2812,5	0,58	1

J2 — jura środkowa (Middle Jurassic), J1 — jura dolna (Lower Jurassic), T3 — trias górny (Upper Triassic), T2 — trias środkowy (Middle Triassic), T1 — trias dolny (Lower Triassic), PZ3 — cechsztyń — Leine (Zechstein-Leine), PZ2 — cechsztyń — Stassfurt (Zechstein-Stassfurt), PZ1 — cechsztyń — Werra (Zechstein-Werra), C1 — karbon dolny (Lower Carboniferous)

4) w rekonstrukcji zmian pola termicznego w analizowanym obszarze uwzględniono historię zmian temperatury powierzchniowej (np. Wygrala, 1989; Yalcin i in., 1997) w odniesieniu do zmian pozycji płyty europejskiej (np. Besse i Courtillot, 1991; Van der Voo, 1993; Nawrocki, 1997),

5) dojrzałość termiczną materii organicznej obliczono metodą EASY %R_o (Sweeney & Burnham, 1990). Generowanie węglowodorów obliczano zgodnie z modelem zaproponowanym przez Peppera i Corviego (1995), a ekspulsję metodą nasycenia przestrzeni porowej (Ungerer i in., 1988a, b, 1990; Forbes i in., 1991),

6) granice stratygraficzne wydzielonych warstw i luk stratygraficznych przyjęto według tabel Gradsteina i Ogga (1995) oraz Meninga (1995).

Powyższa metodyka uściśla wielkość podstawowych parametrów procesu generacyjnego w rekonstrukcji rozkładu faz generacyjnych i ilościowych wskaźników potencjału węglowodorowego w badanych basenach naftowych.



Ryc. 4. Alternatywne modele ewolucji strumienia ciepłego w analizowanych profilach wierceń strefy Kamienia Pomorskiego; I — model termiczno-erozyjny I (Karnkowski, 1999), II — model termiczno-erozyjny II (Poprawa, 2000)

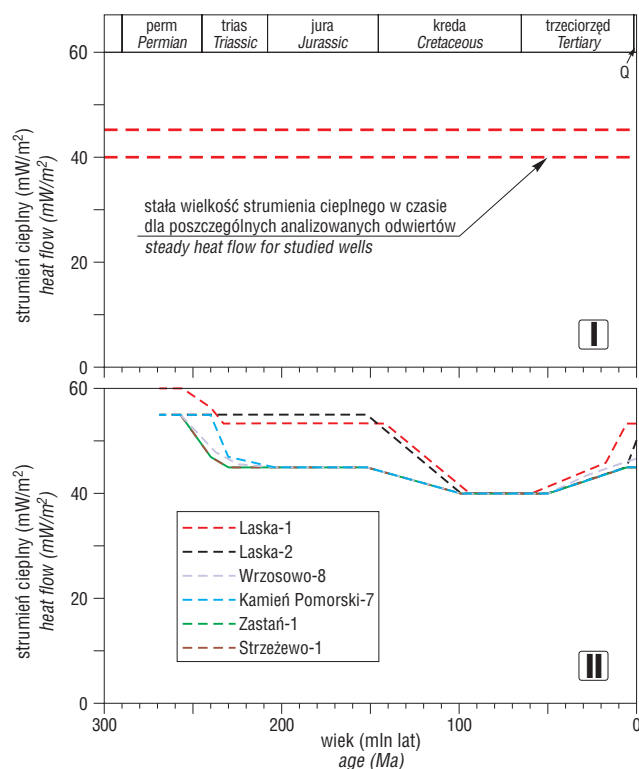
Fig. 4. Alternative models of heat flow evolution in analysed wells of Kamień Pomorski area; I — thermal-erosion model I (Karnkowski, 1999), II — thermal-erosion model II (Poprawa, 2000)

Założenia geologiczne i termiczne modelu generacyjnego

Podstawą modelu koncepcyjnego w celu odtworzenia przebiegu procesów generowania i ekspulsji węglowodorów jest rekonstrukcja ewolucji geologicznej obszaru, w której elementy — stratygrafii, miąższości i litologii warstw oraz tektoniki i luk erozyjnych profilu osadowego są wyjściowymi parametrami konstrukcji wykresu pogażenia warstwy macierzystej w rekonstruowanych warunkach paleotermicznych.

Model ewolucji geologicznej systemu naftowego dolomitu głównego w strefie Kamienia Pomorskiego opiera się na rozwoju cechsztyńskiego kompleksu ewaporatowego w ścisłym związku z rozwojem tektonicznym pokrywy mezozoicznej w zachodniopomorskiej części basenu. Dlatego odtworzenie podstawowych cech geologicznych (miąższość pierwotna, litologia, wielkość erozji itd.) pokrywy permsko-mezozoicznej jest istotnym czynnikiem rozwiązań modeli generowania i ekspulsji węglowodorów w analizowanych profilach wierceń. W tym układzie geologicznym, cechsztyński kompleks ewaporatowy, o miąższości do ponad 1500 m, obejmuje cztery cyklotemy w sekwencji transgresywno-regresywnych utworów soli, anhydrytów, węglanów i iłowców (Wagner, 1988, 1994). Występujący u podstawy cyklotemu PZ2-Stassfurt poziom dolomitu głównego ma miąższość od kilku do ponad 80 m i tworzy jednorodny kompleks węglanowy, w

którym występują jedyne w profilu cechsztynu, kwalifiko-



Ryc. 5. Krzywe kalibracyjne modeli termiczno-erozyjnych odwiertu Laska-2; 1 — model termiczno-erozyjny I, przy wielkości erozji przełomu kredy i trzeciorzędu $E=350$ m i dopasowaniu do temperatury T_{max} , 2 — model termiczno-erozyjny II, przy wielkości erozji przełomu kredy i trzeciorzędu $E=350$ m i dopasowaniu do temperatury T_{max} , 3 — model termiczno-erozyjny II, przy wielkości erozji przełomu kredy i trzeciorzędu $E=700$ m i dopasowaniu do refleksyjności wityryny R_r

Fig. 5. Calibration curves for thermal-erosion models in Laska-2 well; 1 — thermal-erosion model I with Cretaceous-Tertiary erosion $E=350$ m fit to T_{max} temperature, 2 — thermal-erosion model II with Cretaceous-Tertiary erosion $E=350$ m fit to T_{max} temperature, 3 — thermal-erosion model II with Cretaceous-Tertiary erosion $E=700$ m fit to vitrinite reflectance R_r

wane facje skał macierzystych i śródformacyjne facje zbiornikowe (Kotarba i in., 1998a, b, 2003).

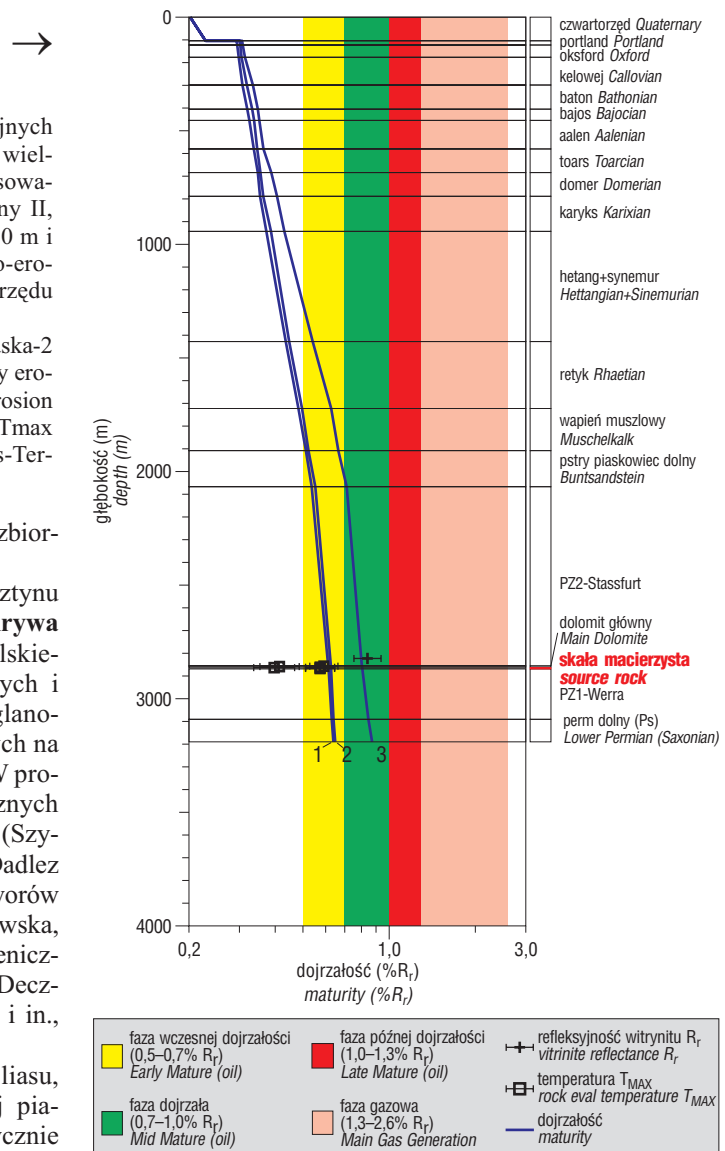
W ciągłości sedymentacyjnej z utworami cechsztynu zalega mezozoiczny kompleks strukturalny. **Pokrywa mezozoiczna**, w pomorskim segmencie rowu śródpolskiego została uformowana z sekwencji transgresywnych i regresywnych kompleksów terygeniczych i węglanowych triasu, jury i kredy, wyniesionych i erodowanych na przełomie kredy i trzeciorzędu (Dadlez i in., 1995). W profilu triasu wyróżnia się dolnotriasową serię terygeniczych utworów pstręgo piaskowca o miąższości do 1200 m (Szyperko-Teller & Moryc, 1988; Szyperko-Teller, 1997; Dadlez i in., 1998), środkowotriasową serię węglanowych utworów wapienia muszlowego o miąższości do 350 m (Gajewska, 1997; Dadlez i in., 1998) i górnortriasową serię terygeniczych utworów kajpru i retyku o miąższości do 800 m (Deczkowski & Franczyk, 1988; Gajewska, 1997; Dadlez i in., 1998).

Profil stratygraficzny jury rozpoczynają osady liasu, rozwinięte w platformowej asocjacji terygeniczej piaskowców i iłowców z pojawiającymi się sporadycznie zespołami skał o cechach typowo morskich. Ich miąższość wynosi od 100 m w części brzeżnej do ponad 1000 m w części środkowej analizowanego obszaru (Deczkowski, 1997; Dadlez i in., 1998). W profilu doggeru wyróżnia się transgresywne morskie utwory iłowcowo-mułowcowe z piaskowcami o miąższości od 100 m w części brzeżnej do ponad 500 m w części środkowej basenu (Dayczak-Calikowska, 1997; Dadlez i in., 1998). Profil litostratygraficzny jury górnej obejmuje utwory terygeniczne z wkładkami węglanowymi o miąższości od 300 m w części brzeżnej, do

Tab. 2. Pomiary temperatury T_{max} w profilu dolomitu głównego wykorzystane do kalibracji modeli termiczno-erozyjnych

Table 2. Rock Eval temperature T_{max} values for Main Dolomite strata used to calibration of thermal-erosion models

Odwiert <i>Well</i>	Interwał opróbowania <i>Sampling interval</i>	T_{max}	Liczba próbek <i>Number of samples</i>
Laska-2	2857,0–2865,4	419–430	4
Laska-1	2820,2–2827,0	424–431	10
Strzeżewo-1	2791,3–2825,4	424–441	20
Kamień Pomorski-2z	2320,9	433	1
Kamień Pomorski-4z	2372,2–2374,1	432–436	2
Zastań-1	2324,8–2330,8	416–431	2
Wrzosowo-8	2739,2–2757,0	438–441	6



ponad 700 m w części osiowej pomorskiego segmentu basenu (Niemczycka & Brochwicz-Lewiński, 1988; Niemczycka, 1997).

Pokrywa kredowa w zachodniopomorskiej części basenu mezozoicznego obejmuje do 300 m terygeniczych utworów z przedziału stratygraficznego od środkowego beriasu do górnego albu oraz do ponad 2000 m węglanowo-iłowcowych utworów od górnego albu–cenomanu do mastrychtu (Jaskowiak-Schoeneichowa, 1981; Marek, 1988, 1997; Dadlez i in., 1998). Sedymentacja kredy górnej została przerwana wypiętrzeniem na przełomie kredy i trzeciorzędu, a proces erozji objął utwory kredowe i częściowo jurajskie. Jego rozmiary w środkowej części obszaru pomorskiego wynoszą do 2500 m, a w partiach brzeżnych do 100 m (Dadlez i in., 1997; Poprawa, 2000). W niezgodności strukturalnej z pokrywą mezozoiczną zalegają tu utwory terygeniczne trzeciorzędu i czwartorzędzu o sumarycznej miąższości do ponad 200 m.

Powyższy schemat stratygraficzno-litologiczny cechsztynu, mezozoiku i kenozoiku został przyjęty do konstrukcji wykresów pograżenia jako podstawy modelowania procesów generowania i ekspulsji węglowodo-

rów w analizie naftowej dolomitu głównego strefy Kamienia Pomorskiego (ryc. 3).

Model ewolucji termicznej pogażanego poziomu skał macierzystych był odtwarzany dla kolejnych przedziałów czasowych sedimentacji i konsolidacji profilu osadowego przez dopasowanie do pomierzonych wskaźników dojrzałości termicznej materii organicznej — refleksyjności witryny R_r i temperatury T_{max} (tab. 1, 2) oraz fizycznych parametrów skał. Do ogólnych rozważań analizy naftowej w strefie Kamienia Pomorskiego dla jej profilu litostratigraficznego od cechsztynu do trzeciorzędu przyjęto dwa alternatywne regionalne modele ewolucji termicznej (ryc. 4).

Model termiczny I — zakłada stałą wielkość strumienia ciepłego od cechsztynu do czwartorzędu, która wynosi $40\text{--}45\text{ mWm}^{-2}$ (Karkowski, 1999), w zależności od lokalizacji analizowanych profili wierceń.

Model termiczny II — zakłada stałą wielkość strumienia ciepłego od cechsztynu do jury, która w zależności od lokalizacji analizowanych profili wierceń zmienia się od

$40\text{ do }55\text{ mWm}^{-2}$ oraz jego obniżenie w kredzie do $35\text{--}40\text{ mWm}^{-2}$ (Poprawa, 2000).

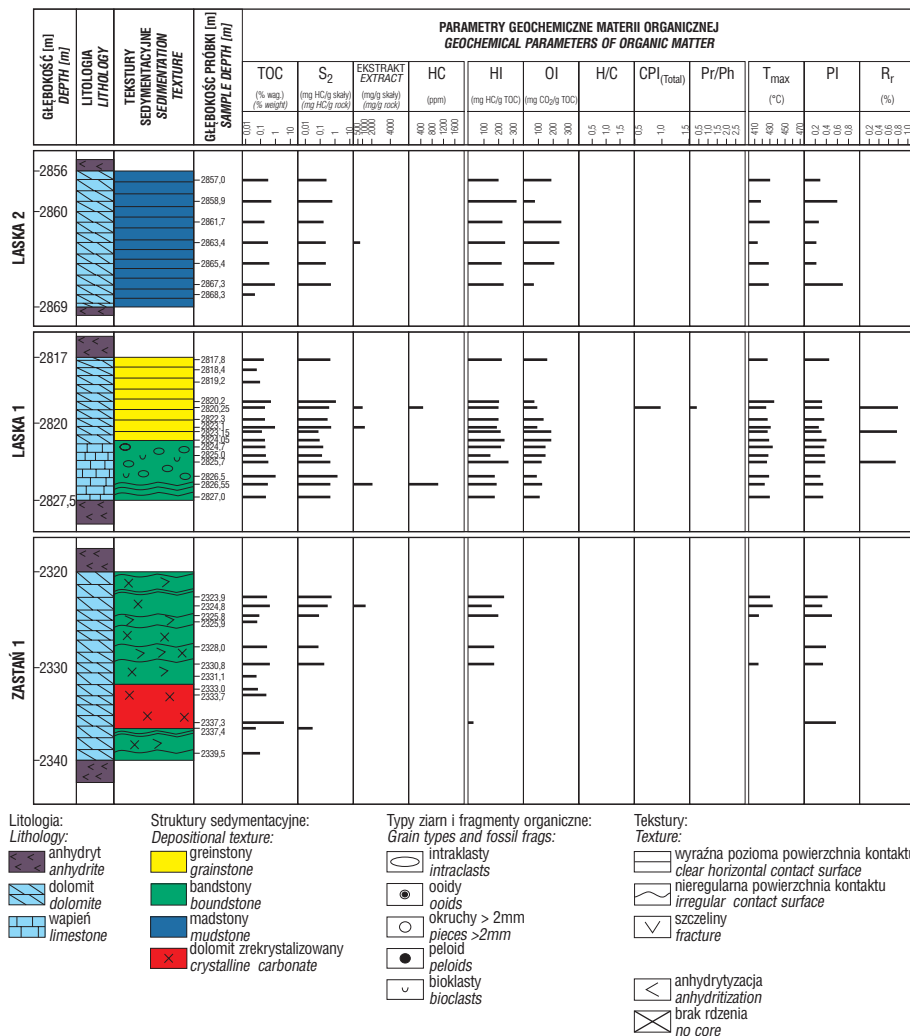
Obydwa modele wykazały podobny stopień dopasowania regionalnych wielkości gęstości strumienia ciepłego i odtworzonych wielkości erozji do pomierzonych wskaźników dojrzałości termicznej materii organicznej dolomitu głównego. Krzywe kalibracyjne powyższego dopasowania przedstawiono na przykładzie profilu odwiertu Laska-2 (ryc. 5). Podobne dopasowanie uzyskano w pozostałych 5 profilach odwiertów. W kalibracji modeli termicznych 6 analizowanych profili wierceń dla utworów mezozoicznego nadkładu uwzględniono wskaźniki transformacji organicznej z odwiertów Brojce IG-1, Czaplinek IG-2 i Kamień Pomorski IG-1 (tab. 1).

Do szczegółowej analizy naftowej obszaru badań wybrano model II, ze względu na dokładniejszą rozdzielność paleotemiczną i dla jego warunków erozyjnych wyliczono wielkość potencjału generacyjnego i ekspulsji.

Wydzielenie poziomów skał macierzystych z geochemiczną kwalifikacją ich macierzystości

Wyjściowym materiałem dokumentacyjnym powyższej analizy jest zestaw 6 profili wierceń (ryc. 1, 2), które charakteryzują rozwój dolomitu głównego w strefie Kamienia Pomorskiego i mają wystarczające rozpoznanie geochemiczne (Kotarba i in., 2003). Obszar platformy węglanowej obejmuje facje greinstonowe, które w analizowanej strefie spełniają warunki szczelinowych skał zbiornikowych (Semyrka, 1985; Darlak i in., 1998; Gąsiewicz i in., 1998) i facje bandstonowe o bardzo dobrych cechach pierwotnej macierzystości (Kotarba i in., 2003). W bezpośrednim otoczeniu platformy węglanowej wyróżnia się strefę stoku platformy z utworami facji greinstonowej i madstonowej o dobrych cechach pierwotnej macierzystości algowej oraz strefę równi basenowej z facją madstonową o podobnych cechach macierzystości (Kotarba i in., 2003).

Wydzielenie kwalifikowanych ilościowo poziomów skał macierzystych w analizowanych profilach wierceń oparto na wynikach badań geochemicznych tych profili (ryc. 6, 7) z uwzględnieniem regionalnego rozkładu macierzystości utworów dolomitu głównego platformy węglanowej Kamienia Pomorskiego i



Ryc. 6. Profile geochemiczno-sedymentologiczne odwiertów Laska-2, Laska-1 i Zastań-1, wykorzystanych do analizy generacyjnej; TOC — całkowita zawartość węgla organicznego, S₂ — zawartość węglowodorów rezydualnych, HC — węglowodory, HI — wskaźnik wodorowy, OI — wskaźnik tlenowy, CPI — wskaźnik preferencji n-alkanów nieparzystowęglowych nad parzystowęglowymi, Pr/Ph — pristan/fitan, PI — wskaźnik produktywności

Fig. 6. Geochemical and sedimentology profiles of Laska-2, Laska-1 and Zastań-1 wells used in generation analysis; TOC — total organic carbon, S₂ — amount of residual hydrocarbons, HC — hydrocarbons, HI — hydrogen index, OI — oxygen index, CPI — carbon preference index, Pr/Ph — pristan/phytan, PI — production index

bezpośredniego jej otoczenia (Kotarba i in., 2003).

W profilu odwiertu Laska-1, sumaryczna miąższość kwalifikowanych geochemicznie poziomów skał macierzystych w facji madstonowej wynosi około 4 m. Skorygowanie kwalifikacji geochemicznej z wynikami analizy sedimentologiczno-petrograficznej (ryc. 6) uściśliło miąższość efektywną skał macierzystych do 6 metrów. Dla powyższego kompleksu macierzystego oszacowana średnia pierwotna zawartość TOC wynosi 0,5% wag. Na podobnej zasadzie oceniono miąższość efektywną skał macierzystych i średnią pierwotną zawartość TOC w pozostałych profilach dolomitu

głównego, która wynosi odpowiednio: w profilu wiercenia Laska-2 ok. 8 m przy zawartości średniej TOC = 0,5% wag., w profilu Zastań-1 — ok. 5 m z TOC = 0,4% wag., Kamień Pomorski-7 — ok. 5 m z TOC = 0,4% wag., Wrzosowo-8 — ok. 5 m z TOC = 1,0% wag. i Strzeżewo-1 — ok. 23 m z TOC = 1,0% wag.

Ocenę naftową skał macierzystych dolomitu głównego przeprowadzono metodą jakościowych modelowań dojrzałości termicznej kerogenu z wyznaczeniem przedziałów odpowiadającego im rozkładu faz generacyjnych.

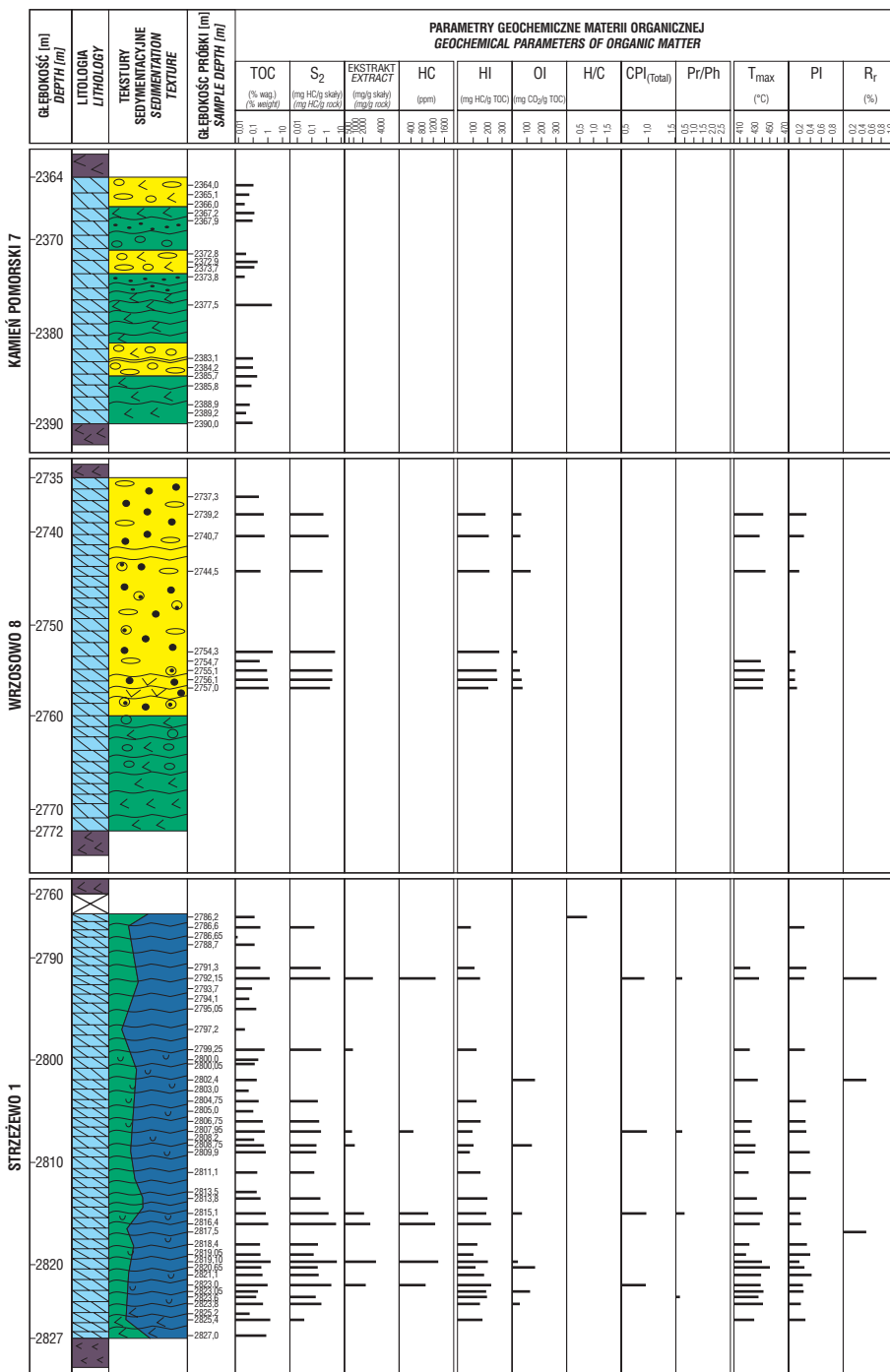
Analizę ilościową procesu generowania i ekspulsji węglowodorów wykonano metodą modelowań kinetycznych. Pozwoliła ona na wydzielenie granic wytworzonych faz węglowodorowych oraz obliczenie potencjału węglowodorowego jednostki objętości skały macierzystej i jednostkowego potencjału powierzchniowego powierzchni strukturalnej basenu dolomitu głównego.

W modelowaniach procesów generowania węglowodorów przyjęto położenie wydzielonych miąższości skał macierzystych w spągu profilu dolomitu głównego ze względu na to, że jego miąższość całkowita nie przekracza jednostkowego przedziału skali przemian termicznych kerogenu.

Identyfikacja faz węglowodorowych i czasu ich powstania

W rozpatrywanym przekroju poprzecznym strefy Kamienia Pomorskiego uzyskano następujący wynik analizy generacyjnej skał macierzystych dolomitu głównego w profilach odwiertów Laska-2, Laska-1, Zastań-1, Kamień Pomorski-7, Wrzosowo-1 i Strzeżewo-1.

W zrekonstruowanych warunkach termicznych modelu II, przy dopasowanej wielkości erozji polaramijskiej 600–1100 m, skały macierzyste dolomitu głównego weszły w wstępną fazę dojrzałości termicznej (0,5–0,7% w skali R_r) w triasie górnym, w przedziale czasowym od 227 mln lat w profilu Wrzosowo-8, do 203 mln lat w profilu Laska-2, przy pograżeniu od 1750 m w profilu Laska-1, do 2200 m w profilu Strzeżewo-1 (ryc. 8, 9). Rozwinięta faza dojrzałości termicznej profilu okrą ropnego (0,7–1,0% w skali R_r) została osiągnięta z końcem jury dolnej w odwiertach Laska-1 i



Ryc. 7. Profile geochemiczno-sedymentologiczne odwiertów Kamień Pomorski-7, Wrzosowo-8 i Strzeżewo-1, wykorzystanych do analizy generacyjnej. Objasnienia jak na ryc. 6
 Fig. 7. Geochemical and sedimentology profiles of Kamień Pomorski-7, Wrzosowo-8 and Strzeżewo-1 wells used in generation analysis. Explanation see Fig. 6

Wrzosowo-8 i w jurze środkowej w odwiercie Laska-2, przy głębokości pograżenia rzędu 2700–2950 m. Maksymalne pograżenie poziomu macierzystego dolomitu głównego w analizowanych profilach, osiągnięte w kredzie górnej, nie spowodowało już przyrostu dojrzałości termicznej kerogenu (ryc. 8, 9).

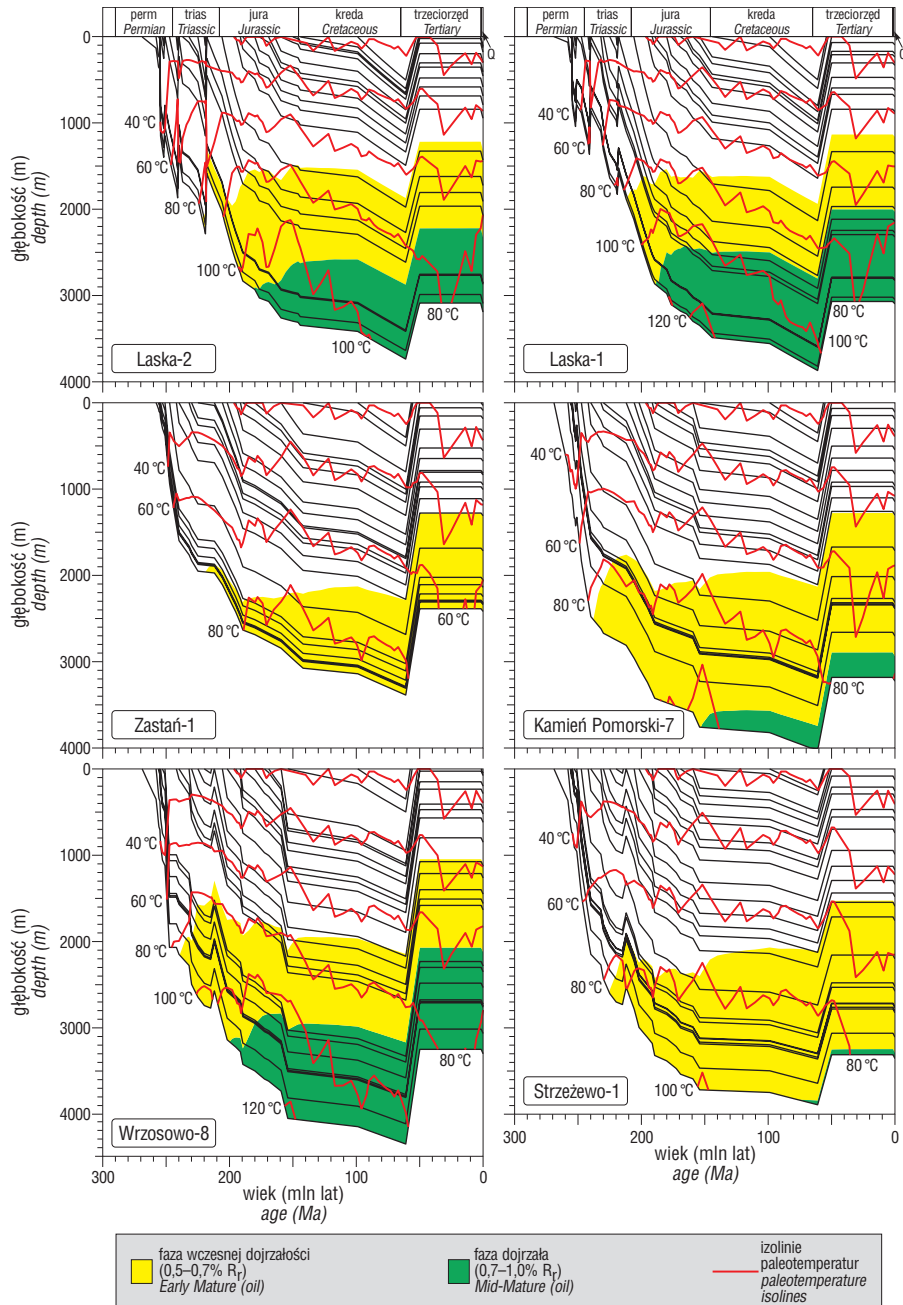
Ocena potencjału węglowodorowego

Zidentyfikowanie, w kryteriach dojrzałości termicznej kerogenu, występowania faz generacyjnych w poziomach skał macierzystych dolomitu głównego dało podstawę ilo-

ściowej oceny ich potencjału węglowodorowego w modelowaniach kinetycznych.

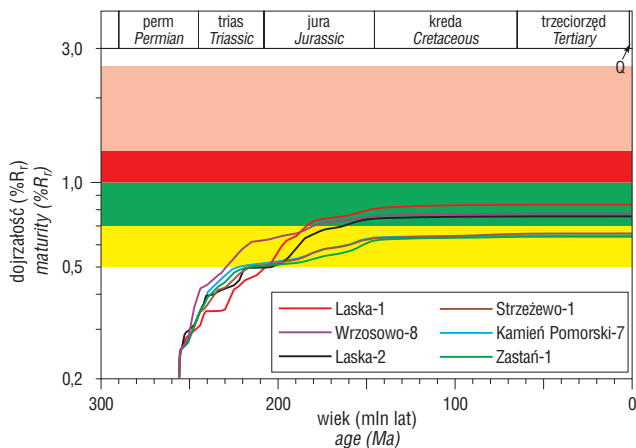
Modelowanie kinetyczne warunków generowania i ekspulsji węglowodorów wykazało, że skały macierzyste dolomitu głównego weszły w triasie górnym w przedział generacyjny fazy wczesnej, realizując do 25% potencjału generacyjnego i do końca jury dolnej osiągnęły fazę główną — 25–65% potencjału generacyjnego (ryc. 10). Przedział generacyjny fazy późnej — 65–90% potencjału generacyjnego, został osiągnięty przed laramijskim wydzwignięciem obszaru.

Powyższy stan warunków generacyjnych w strefie Kamienia Pomorskiego został spowodowany wysokim



Ryc. 8. Krzywe pograżenia wydzielonych kompleksów litostratigraficznych z przedziałami dojrzałości termicznej kerogenu według modelu termiczno-erozyjnego II. W rozkładzie izolinii paleotemperatur wglębnych uwzględnia się wpływ paleotemperatur powierzchniowych wyróżnionych przedziałów stratygraficznych

Fig. 8. Burial history curves for selected lithostratigraphic complexes with thermal maturity zones according to the thermal-erosion model II. In paleotemperatures distribution, the influence of surface paleotemperatures of selected stratigraphic intervals was taken into account



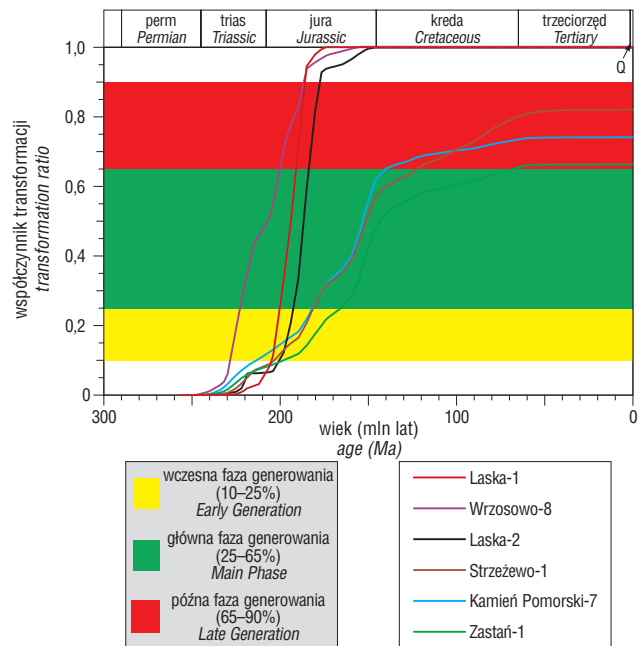
Ryc. 9. Krzywe ewolucji dojrzałości w analizowanych odwiertach strefy Kamienia Pomorskiego. Objaśnienia przedziałów dojrzałości termicznej na ryc. 8
Fig. 9. Maturity evolution curves for analysed wells on Kamień Pomorski area. Explanation thermal maturity zones Fig. 8

stopniem transformacji termicznej kerogenu, od 70% w odwiertach Zastań-1, Kamień Pomorski-7 i Strzeżewo-1 do całkowitej transformacji w odwiertach Laska-1, Laska-2 i Wrzosowo-8 (ryc. 10).

Z wyników modelowań procesów generowania i ekspulsji węglowodorów, obliczono potencjał generacyjny jednostki objętości skały macierzystej i potencjał ekspulsji, w wymiarze odpowiednio ilości wygenerowanych węglowodorów z m³ skały macierzystej i ilość węglowodorów wydanych z m³ skały macierzystej.

Obliczony potencjał generacyjny mieści się w przedziale od minimalnej wielkości 2,6 kg HC/m³ s.m. w profilu dolomitu głównego odwiertu Zastań-1 do maksymalnej wielkości 9,6 kg HC/m³ s.m. w profilu odwiertu Wrzosowo-8 (ryc. 11). Potencjał ekspulsji wynosi odpowiednio od 2,5 kg HC/m³ s.m. w profilu odwiertu Zastań-1 do 8,8 kg HC/m³ s.m. w profilu Wrzosowo-8 (ryc. 11).

Odniesienie potencjału ekspulsji do sumarycznej miąższości skał macierzystych w profilu dolomitu głównego pozwala na ocenę produktywności naftowej jednostki powierzchni basenu sedimentacyjnego. Obliczone stąd wielkości jednostkowego powierzchniowego potencjału węglowodorowego wynoszą, od 11 do 53 kg HC/m² powierzchni strukturalnej basenu dolomitu głównego z anomalną wielkością 163 kg HC/m² (tab. 3). Stwierdzona



Ryc. 10. Stopień transformacji kerogenu w utworach dolomitu głównego strefy Kamienia Pomorskiego
Fig. 10. Transformation ratio of kerogen in Main Dolomite strata on Kamień Pomorski area

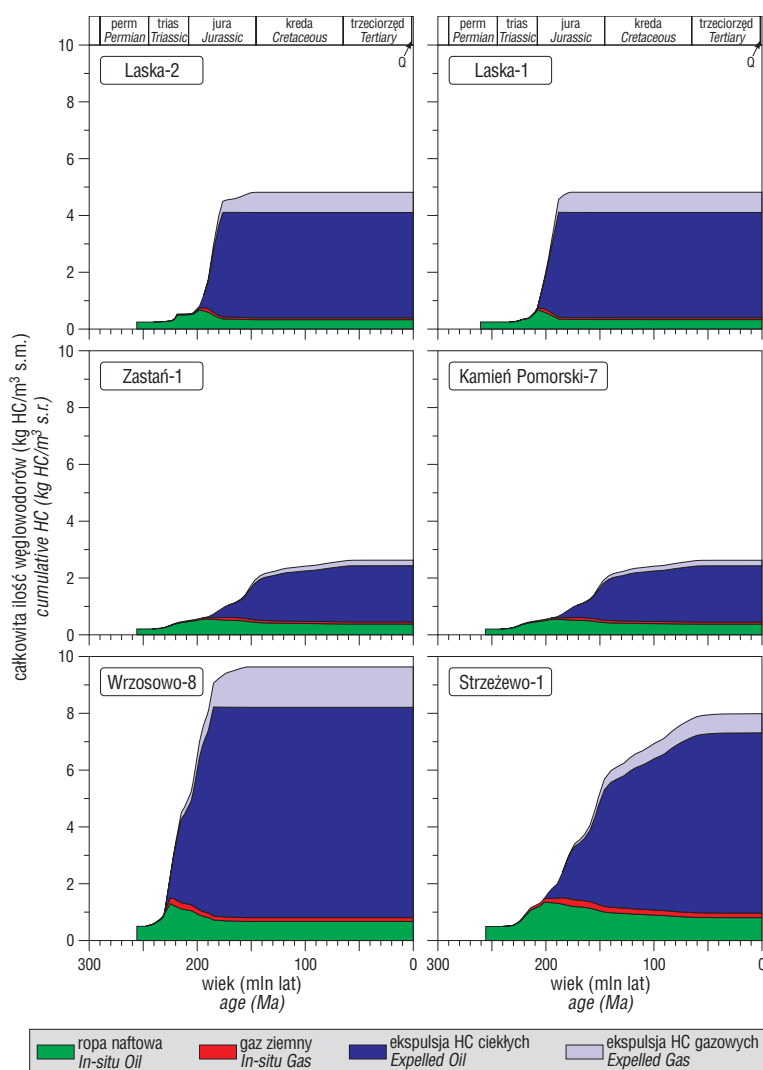
podwyższona wielkość jednostkowego powierzchniowego potencjału węglowodorowego wynosząca 163 kg HC/m² basenu w profilu Strzeżewo-1 wskazuje na możliwość występowania w analizowanym rejonie lokalnych stref o wysokim potencjale węglowodorowym.

Wyliczone wielkości potencjału generacyjnego i potencjału ekspulsji (tab. 3) zostały uśrednione dla skały analizowanego obszaru. Średni powierzchniowy potencjał generacyjny powierzchni strukturalnej dolomitu głównego wynosi 56,1 kg HC/m², a średni powierzchniowy potencjał ekspulsji powierzchni strukturalnej dolomitu głównego 50,2 kg HC/m². Odniesienie powyższych wielkości potencjału do powierzchni zbioru akumulacyjnego platformy Kamienia Pomorskiego ocenianej na 2800 km² daje 150 mln t węglowodorów wygenerowanych z powierzchni zbioru i 140 mln t węglowodorów wydanych. Odniesienie wielkości wygenerowania i wielkości ekspulsji do sumarycznej wielkości zasobów geologicznych złóż powyższej strefy wynoszących 22,9 mln t ropy naftowej

Tab. 3. Wielkość potencjału generacyjnego i potencjału ekspulsji oraz jednostkowego powierzchniowego potencjału węglowodorowego dolomitu głównego w odwiertach strefy platformy węglanowej Kamienia Pomorskiego

Table 3. Quantity of generation, expulsion and hydrocarbon potentials of Main Dolomite strata in wells on Kamień Pomorski carbonate platform

Odwiert <i>Well</i>	Miąż. poziomą skał macierzystych <i>Source rock thicknesses [m]</i>	Potencjał jednostkowy <i>Potential unit</i>		Potencjał powierzchniowy <i>Surface potential</i>	
		generacyjny <i>generation</i>	ekspulsji <i>expulsion</i>	generacyjny <i>generation</i>	ekspulsji <i>expulsion</i>
		kg HC/m ³ s.m. (dry mass)		kg HC/m ² basenu kg HC/m ² (basin)	
Laska-2	8	4,8	4,4	38	35
Laska-1	6	4,8	4,4	29	26
Zastań-1	5	2,6	2,2	13	11
Kamień Pomorski-7	5	2,9	2,5	15	13
Wrzosowo-8	6	9,6	8,8	58	53
Strzeżewo-1	23	8,0	7,1	184	163



Ryc. 11. Całkowita ilość wytworzonych i wydanych węglowodorów z poziomów skał macierzystych dolomitu głównego strefy Kamienia Pomorskiego
Fig. 11. Total amount of hydrocarbon generated and expelled from Main Dolomite source rocks on Kamień Pomorski area

(Nowicka, 2002) pozwala wyznaczyć dwa podstawowe wskaźniki akumulacyjne.

Wskaźnik GAE (ang. *generation-accumulation efficiency*) — stosunek wielkości akumulacji do wydajności generacyjnej, który dla strefy platformy węglanowej Kamienia Pomorskiego wynosi 15%, co w odniesieniu do publikowanych wielkości globalnych 2–14% (Hunt, 1996) wskazuje na wysoką wydajność kerogenu dolomitu głównego i szczelność struktur akumulacyjnych.

Wskaźnik %E — stosunek wydajności ekspulsji do akumulacji (zasoby geologiczne $\times 100$ /wskaźnik ekspulsji), wynosi 16% i mieści się w przedziale średnich wielkości podawanych w dostępnej literaturze (Hunt, 1996).

Powyższe wskaźniki są testem naftowym zamkniętej strefy akumulacyjnej Kamienia Pomorskiego i mają jedynie znaczenie porównawcze dla bilansu węglowodorowego innych dokumentowanych obszarów poszukiwawczych.

Podsumowanie analizy ropotwórczości

Analiza procesu generowania węglowodorów ze skał macierzystych dolomitu głównego strefy platformy węglanowej Kamienia Pomorskiego wykazała, że dla przyjętego

modelu termiczno-erozyjnego, proces ten przebiegał w przedziale stratygraficznym pomiędzy triasem górnym i jurą środkową.

Ilość wytworzonej masy węglowodorowej, liczona w kryteriach jednostkowego potencjału generacyjnego skały macierzystej wynosi od 2,6 do 9,6 kg HC/m³ s.m., natomiast wyliczona wielkość jednostkowego potencjału ekspulsji mieści się w przedziale od 2,5 do 8,8 kg HC/m³ s.m. (tab. 3). Obliczona na tej podstawie wielkość jednostkowego powierzchniowego potencjału węglowodorowego powierzchni strukturalnej dolomitu głównego w badanej strefie wynosi od 11 do 53 kg HC/m² z podwyższoną wielkością 163 kg HC/m² w odwiercie Strzeżewo-1.

Powyższe wielkości potencjału węglowodorowego platformy węglanowej Kamienia Pomorskiego uwarunkowały akumulacje udokumentowanych złóż w proporcji wykorzystania 16% wytworzonego potencjału ekspulsji węglowodorów.

Autorzy dziękują Panu doc. Ryszardowi Wagnerowi z Państwowego Instytutu Geologicznego w Warszawie za udostępnienie materiałów niepublikowanych i konsultacje oraz Pani dr Izabelli Grotek z Państwowego Instytutu Geologicznego w Warszawie oraz Panu prof. Marianowi Wagnerowi z Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie za udostępnienie niepublikowanych wyników pomiarów refleksyjności wityritu. Wnikliwe i merytoryczne uwagi w recenzji Pana mgr inż. Pawła Poprawy pozwoliły na wprowadzenie istotnych poprawek. Niniejsza publikacja jest oparta na wynikach badań uzyskanych w trakcie realizacji prac statutowych nr 11.11.140.970, finansowanych przez Komitet Badań Naukowych i wykonanych w Zakładzie Surowców Energetycznych na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, z wykorzystaniem materiałów z grantu Komitetu Badań Naukowych nr 8T12B 04021 oraz z opracowań wykonanych dla Polskiego Górnictwa Naftowego i Gazownictwa S.A. w Warszawie.

Literatura

- BASINMOD™ 1-D Reference Manual 1987 — Platte River Association. Boulder, Colorado.
 BESSE J. & COURTILOT V. 1991 — Revised and synthetic apparent polar wander paths of the African, Euroasian, North American and India Plates, and true polar wander since 200 Ma. *Jour. Geophys. Res.*, 96 (B3): 4029–4050.
 DADLEZ R., NARKIEWICZ M., STEPHENSON R.A., VISSER M.T.M. & VAN WEES J.-D. 1995 — Tectonic evolution of the Mid-Polish Trough: modelling implications and significance for central European geology. *Tectonophysics*, 252: 179–195.
 DADLEZ R., JÓ WIĄK W. & MŁYNARSKI S. 1997 — Subsidence and inversion in the western part of Polish Basin — data from seismic velocities. *Geol. Quater.*, 41: 197–208.
 DADLEZ R., MAREK S. & POKORSKI J. (ed.) 1998 — Atlas paleogeograficzny epikontynentalnego permu i mezozoiku w Polsce. Państw. Inst. Geol.
 DARŁAK B., KOWALSKA-WŁODARCZYK M., KOBYLECKA A., LESNIAK G. & SUCH P. 1998 — Przegląd wyników badań właściwości zbiornikowych i filtracyjnych wybranych skał zbiornikowych basenów młodopaleozoicznych Niżu Polskiego. [In:] Narkiewicz M. (ed.),

- Analiza basenów sedymentacyjnych Niżu Polskiego. Pr. Państw. Inst. Geol., 165: 147–153.
- DAYCZAK-CALIKOWSKA K. 1997 — Jura środkowa – sedymentacja, paleogeografia i paleotektonika. [In:] Marek S., Pajchłowa M. (red.), Epikontynentalny perm i mezozoik w Polsce. Pr. Państw. Inst. Geol., 153: 269–283.
- DECZKOWSKI Z. & FRAN CZYK M. 1988 — Paleomiąższość, litofacje i paleotektonika noryku i retyku na Niżu Polskim. Kwart. Geol., 32: 93–102.
- DECZKOWSKI Z. 1997 — Trias górny — sedymentacja, paleogeografia i paleotektonika. [In:] Marek S., Pajchłowa M. (ed.), Epikontynentalny perm i mezozoik w Polsce. Pr. Państw. Inst. Geol., 153: 184–187.
- DEMING D. & CHAPMAN D.S. 1989 — Thermal histories and hydrocarbon generation: example from Utah-Wyoming thrust belt. AAPG Bull., 73: 1455–1471.
- DOLIGEZ B., BESSIS F., BURRUS J., UNGERER Ph. & CHENET P.Y. 1986 — Integrated numerical modelling of sedimentation, heat transfer, hydrocarbon formation and fluid migration in sedimentary basin. [In:] Burrus J. (ed.), Thermal modelling in Sedimentary Basins. Technip, Paris: 173–195.
- DORE A.G., AUGUSTSON J.H., HERMANRUD C., STEWART D.J. & SYLTA O. (eds.) 1993 — Basin Modelling: Advances and Applications. NPF Spec. Publ. 3, Elsevier, Amsterdam.
- DYKSTRA J. 1987 — Compaction correction for burial history curves: application to Lopatin's method for source rock maturation determination. GeoByte, 2: 16–23.
- FORBES P.L., UNGERER., KUHFUSS A.B., RIIS F. & EGGEN S. 1991 — Compositional modelling of petroleum generation and expulsion. Trial application to as local mass balance in the Smorbukk Sor field (Norway). AAPG Bull., 75: 873–893.
- GAJEWSKA I. 1997 — Trias środkowy — sedymentacja, paleogeografia i paleotektonika. [In:] Marek S., Pajchłowa M. (ed.), Epikontynentalny perm i mezozoik w Polsce. Pr. Państw. Inst. Geol., 153: 144–151.
- GAŚIEWICZ A., WICHROWSKA M. & DARŁAK B. 1998 — Sedymentacja i diagenaza a właściwości zbiornikowe utworów dolomitu głównego (Ca₂) w polskim basenie cechsztyńskim. [In:] Narkiewicz M. (ed.), Analiza basenów sedymentacyjnych Niżu Polskiego. Pr. Państw. Inst. Geol., 165: 195–203.
- GRADSTEIN F.M. & OGG J.G. 1995 — A Phanerozoic time scale. Episodes, 19.
- HUNT J. M. 1996 — Petroleum geochemistry and geology. W.H. Freeman and Company, San Francisco.
- JASKOWIAK-SCHOENECHOWA M. 1981 — Sedymentacja i stratygrafia kredy górnej w północno-zachodniej Polsce. Pr. Inst. Geol., 98.
- KARNKOWSKI P. H. 1999 — Origin and evolution of the Polish Rotliegend Basin. Pol. Geol. Inst., Spec. Pap., 3.
- KOTARBA M., KOSAKOWSKI P., KOWALSKI A., WIĘCŁAW D. 1998a — Wstępna charakterystyka geochemiczna substancji organicznej i potencjału węglowodorowego utworów dolomitu głównego Niżu Polskiego. Pr. Państw. Inst. Geol., 165: 227–235.
- KOTARBA M., WIĘCŁAW D. & KOWALSKI A. 1998b — Wstępna charakterystyka geochemiczna substancji organicznej i potencjału węglowodorowego utworów dolomitu głównego Niżu Polskiego. Pr. Państw. Inst. Geol., 165: 261–273.
- KOTARBA M.J., KOSAKOWSKI P., WIĘCŁAW D. & KOWALSKI A. 2003 — Potencjał naftowy utworów dolomitu głównego w strefie Kamienia Pomorskiego. Część 1 — Macierzystość. Prz. Geol., 51: 587–594.
- MAREK S. 1988 — Paleomiąższość, litofacje i paleotektonika epikontynentalnej kredy dolnej w Polsce. Kwart. Geol., 32: 157–173.
- MAREK S. 1997 — Kreda dolna — sedymentacja, paleogeografia i paleotektonika. [In:] Marek S., Pajchłowa M. (ed.), Epikontynentalny perm i mezozoik w Polsce. Pr. Państw. Inst. Geol., 153: 362–367.
- MENNING M. 1995 — A Numerical Time Scale for the Permian and Triassic Periods: An Integrated Time Scale. [In:] Scholle P.A., Peryt T.M., Ulmer-Scholle D.S. (eds.), The Permian of Northern Pangea, 1, Springer-Verlag: 77–97
- NAWROCKI J. 1997 — Permian to Early Triassic magnetostratigraphy from the Central European basin in Poland: Implications on regional and worldwide correlation. Earth & Planetary Sc. Letters, 152: 37–58
- NIEMCZYCKA T. & BROCHWICZ-LEWINSKI W. 1988 — Rozwój górnourajskiego basenu sedymentacyjnego na Niżu Polski. Kwart. Geol., 32: 132–147.
- NIEMCZYCKA T. 1997 — Jura górna — sedymentacja, paleogeografia i paleotektonika. [In:] Marek S., Pajchłowa M. (ed.), Epikontynentalny perm i mezozoik w Polsce. Pr. Państw. Inst. Geol., 153: 327–333.
- NOWICKA A. 2002 — Ilościowa ocena prognostycznych zasobów geologicznych węglowodorów w poziomie dolomitu głównego w północno-zachodniej Polsce. Basen permski Niżu Polskiego — dolomit główny — budowa i potencjał zasobowy. Konf. Nauk.-Tech., Piła: 89–98.
- PEPPER A.S. & CORVI P.J. 1995 — Simple kinetic models of petroleum formation. Part I: oil and gas generation from kerogen. Mar. Petrol. Geol., 12: 291–319.
- POPRAWA P. 2000 — Analiza historii termicznej basenu polskiego. [In:] Kotarba M. (ed.), Potencjał i bilans węglowodorowy utworów dolomitu głównego basenu permskiego Polski — Blok VII. Raport z realizacji projektu badawczego. Arch. BG Geonafra, Warszawa.
- SEMYRKA R. 1985 — Uwarunkowania roponośności utworów dolomitu głównego na obszarze Pomorza Zachodniego. Pr. Geol. Komis. Nauk Geol. PAN Kraków, 129: 1–114.
- SWEENEY J.J. & BURNHAM A.K. 1990 — Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics. Bull. AAPG, 74: 1559–1570.
- SZYPERKO-TELLER A. 1997 — Trias dolny — sedymentacja, paleogeografia i paleotektonika. [In:] Marek S., Pajchłowa M. (ed.), Epikontynentalny perm i mezozoik w Polsce. Pr. Państw. Inst. Geol., 153: 121–133.
- SZYPERKO-TELLER A. & MORYC W. 1988 — Rozwój basenu sedymentacyjnego pstręgo piaskowca na obszarze Polski. Kwart. Geol., 32: 53–70.
- UNGERER P., ESPITALIE J., BEHAR J. & EGGON F. 1988a — Modelisation mathematique des interaction entre craquege thermique et migration lors de la formation du petrole et du gaz. C. R. Acad. Sc., 2: 927–934.
- UNGERER P., BEHAR F., VILLALBA M., HEUM O.R. & AUDIBERT A. 1988b — Kinetic modelling of oil cracking. Advances of Organic Geochemistry, 13: 857–868.
- UNGERER P., BURRUS J., DOLIGEZ B., CHENET P. & BESSIS F. 1990 — Basin evaluation by integrated 2-D modelling of heat transfer, fluid flow, hydrocarbon generation and migration. Bull. AAPG, 74: 309–335.
- VAN DER VOO R. 1993 — Paleomagnetism of the Atlantic, Tethys and Iapetus Oceans. Cambridge Univ. Press.
- WAGNER R. 1988 — Ewolucja basenu cechsztyńskiego w Polsce. Kwart. Geol., 32: 33–51.
- WAGNER R. 1994 — Stratygrafia osadów i rozwój basenu cechsztyńskiego na Niżu Polskim. Pr. Państw. Inst. Geol., 146: 1–71.
- WAGNER R. 2000 — Charakterystyka facjalna i paleogeograficzna utworów dolomitu głównego. [In:] Kotarba M. (ed.), Potencjał i bilans generowania utworów dolomitu głównego basenu permskiego Polski — Blok II. Arch. BG Geonafra, Warszawa.
- WAGNER R., LESZCZYŃSKI K., POKORSKI J. & GOMULAK K. 2002 — Palaeotectonic cross-sections through the Mid-Polish Trough. Geol. Quart., 46: 293–306.
- WELTE D.H., HORSFIELD B. & BAKER D.R. (eds.) 1997 — Petroleum and Basin Evolution, Springer-Verlag.
- WYGRALA B. 1989 — Integrated study of an oil field in the southern Po Basin, northern Italy. Berichte der Forschungszentrum, Germany, 2313.
- YALCIN M.N., LITTKER R. & SACHSENHOFER R.F. 1997 — Thermal History of Sedimentary Basins. [In:] Welte D.H., Horsfield B., Baker D.R. (eds.), Petroleum and Basin Evolution. Springer: 71–168.