

## Ocena macierzystości i potencjału naftowego utworów jury środkowej południowo-wschodniej Polski

Maciej J. Kotarba\*, Dariusz Więclaw\*, Paweł Kosakowski\*, Jarosław Zacharski\*\*, Adam Kowalski\*

**Evaluation of source rock and petroleum potential of Middle Jurassic strata in the south-eastern part of Poland.** *Prz. Geol.*, 51:1031–1040.

*S u m m a r y.* The Middle Jurassic strata in the SE Poland occur on the Kraków–Brzesko, Tarnów and Rzeszów areas. It follows from the organic geochemical analysis of the Dogger strata have a low organic matter content 0.2 to 0.6% wt., to significantly increase in the Rzeszów area up to 3.8% wt. The highest organic matter contents, up to 15.7% wt. in the well Tarnawa-1 is connected with the presence of lamines and lenses of carbonaceous organic matter. Middle Jurassic organic matter is of mixed type — kerogen II/III in the Kraków–Brzesko and Tarnów areas, and terrestrial — kerogen type III in the Rzeszów area. The Dogger source rocks in the Kraków–Brzesko and Tarnów areas are immature. In the Rzeszów area they are qualified at the beginning of oil window generation. Therefore, the generation potential was modelled in reference only to the Middle Jurassic profile in the Rzeszów area. The thermal maturity of organic matter and kinetic transformation of kerogen did not produce a significant generation potential and did not cross threshold of hydrocarbon expulsion. To obtain good conditions for hydrocarbon generation within the Middle Jurassic strata, they should be buried below 5000 meters due to the low thermal gradient of the overthrust Carpathian Flysch. In such situation, the deep buried Dogger source rocks could supply the recognised Upper Cretaceous and Upper Jurassic oil accumulations of the Carpathian Foredeep basement.

**Key words:** Middle Jurassic, source rock, petroleum geochemistry, hydrocarbon potential, modelling of generation and expulsion processes, basement of the Carpathian Foredeep

W profilu litologiczno-stratygraficznym podmiocieńskich utworów podłoża mezozoicznego w strefie Karpat fliszowych i zapadliska przedkarpackiego wyodrębnia się kompleks terygenicznych utworów jury środkowej o dotychczas niezdefiniowanej geochemicznie macierzystości poziomów iłowcowych i mułowcowych oraz nieokreślonych cechach ich potencjału węglowodorowego.

W obszarze Polski Południowej, na wschód od Krakowa, klastyczne utwory jury środkowej zostały udokumentowane w trzech odrębnych strefach: zachodniej (pomiędzy Krakowem i Brzeskiem, która kontynuuje się dalej ku północy w niecce miechowskiej), środkowej (w okolicy Tarnowa) oraz wschodniej (w okolicy Rzeszowa) (ryc. 1).

W powyższej pracy podjęto problem ilościowej kwalifikacji macierzystości skał profilu doggeru i oceny jego potencjału węglowodorowego, w zależności od głębokości pograżenia, temperatury i czasu, jako parametrów koniecznych dla wytworzenia faz węglowodorowych na podstawie wyników badań organo-geochemicznych próbek potencjalnych skał macierzystych jury środkowej, z profili 9 odwiertów (ryc. 1).

### Zarys stratygrafii i litologii jury środkowej w Polsce południowo-wschodniej

W zachodniej i centralnej strefie badanego obszaru jura środkowa jest reprezentowana przez utwory klastyczne

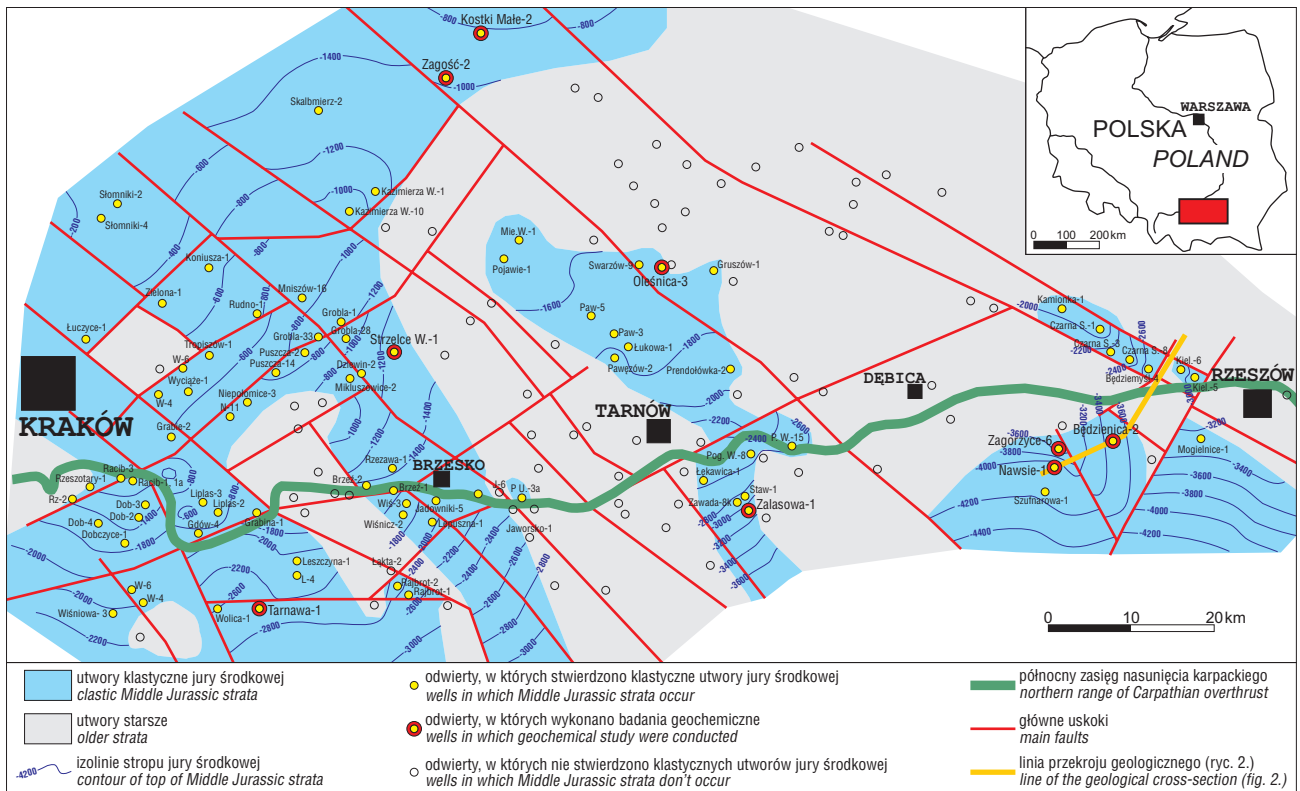
bajosu górnego, batonu i keloweju (Dayczak-Calikowska & Kopik, 1973; Dayczak-Calikowska & Moryc, 1988). Transgresywne zaleganie tych utworów polega na stopniowym wypełnianiu morfologicznych obniżek podolnojurajskiej powierzchni erozyjnej. Profil obejmuje naprzemianległe serie utworów piaskowcowych, mułowcowych i iłowcowych z wapieniami bulastymi w partii stropowej. W ciągłości z wapieniami bulastymi górnego keloweju zalegają przekraczająco utwory górnourajskie (Dayczak-Calikowska & Kopik, 1973; Dayczak-Calikowska & Moryc, 1988; Stemulak & Jawor, 1963). W obrębie serii klastycznych występuje liczny detrytus roślinny oraz laminy i soczewki substancji organicznej (Jawor, 1970; Maksym i in., 1998).

W strefie rzeszowskiej (ryc. 1) utwory jury środkowej stwierdzono wiertniczo w kilkunastu profilach podmiocieńskiego i podfliszowego podłoża. Miąższość tych utworów waha się od kilkunastu metrów, w profilu Kielanówka-6 do ponad trzystu metrów w profilu Będziemyśl-4 (Moryc, 1996). W północno-zachodniej części tej strefy głębokość zalegania serii środkourajskiej jest zmienna i wynosi od 2231 m w odwiercie Kamionka-1 do 3342 m w otworze Kielanówka-6. W części południowo-zachodniej strefy rzeszowskiej strop utworów jury środkowej stwierdzono na głębokości od 3463 m w odwiercie Mogielnica-1 do 4440 m w odwiercie Nawsie-1 (ryc. 1, 2). W kryteriach stratygraficznych utwory jury środkowej obejmują tu poziomy bajosu, batonu i keloweju (Moryc, 1992, 1996). W profilu bajosu górnego, w poziomach mułowcowych stwierdzono dużą ilość rozproszonej substancji organicznej oraz fragmenty glonów, szkarłupni, mszywiolów i otwornic. Piaskowce są zwykle średnio- i gruboziarniste o spoiwie węglanowo-pirytowym, krzemionkowo-illitowym i węglanowym, co wskazywałoby na redukcyjne środowisko depozycji.

Utwory batonu to mułowce i piaskowce drobnoziarniste z uwęgloną florą i laminowanymi cienkimi wkładka-

\*Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Zakład Surowców Energetycznych, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; kotarba@uci.agh.edu.pl

\*\*Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo S.A., Oddział Górnictwo Naftowe, Biuro Geologiczne „Geonafta” Ośrodek Regionalny Południe, ul. Lubicz 25, 31-503 Kraków



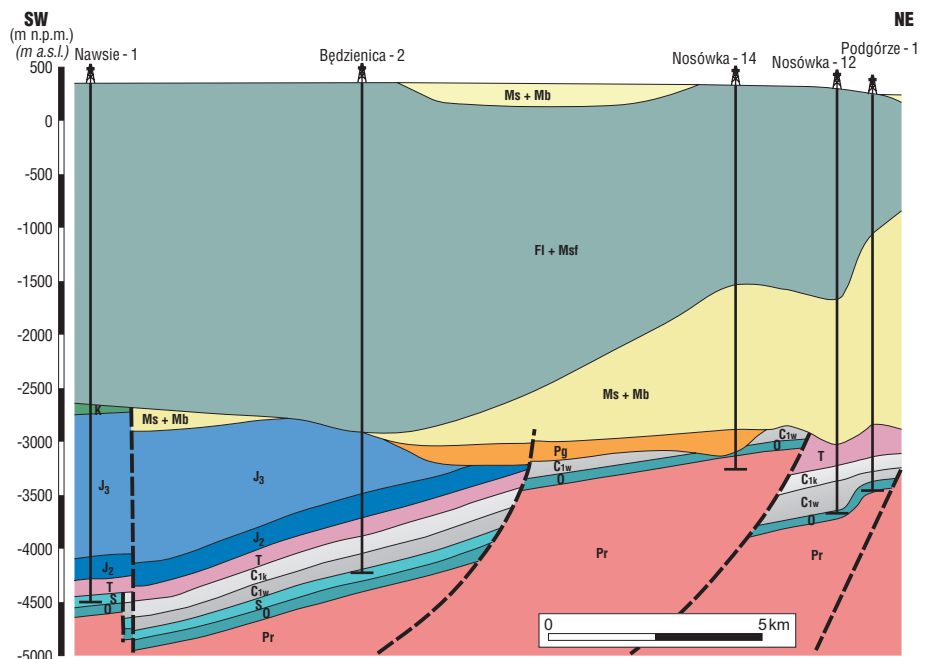
**Ryc. 1.** Mapa strukturalna stopu utworów jury środkowej według Urbanca & Zacharskiego (2002) oraz lokalizacja odwiertów, z których pobrano próbki do badań geochemicznych

**Fig. 1.** Structural map of top of Middle Jurassic strata after Urbaniec & Zacharski (2002) with location of the analysed wells

mi czarnych iłowców. Kelowej w tym obszarze rozwinięty jest podobnie jak baton, w facjach piaskowcowo-mułowcowych.

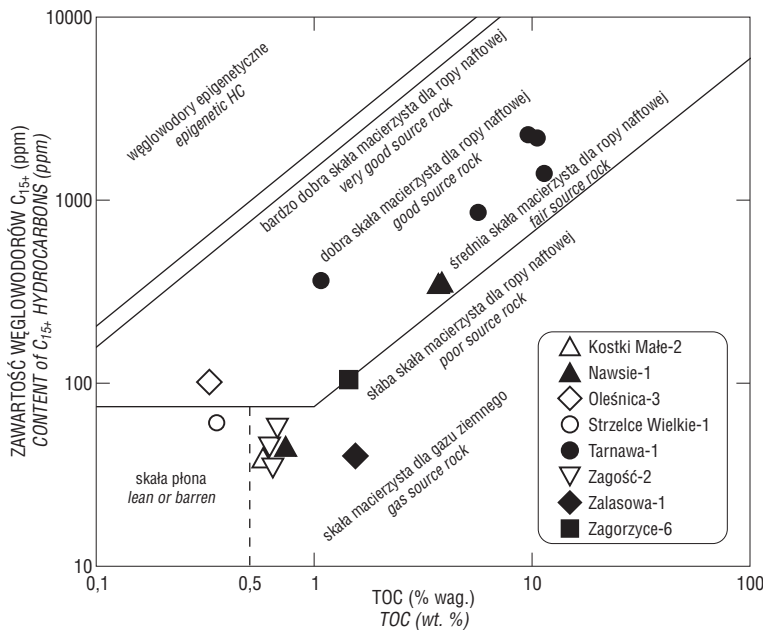
### Metodyka badań geochemicznych

Analizę pirolityczną wykonano za pomocą aparatu Rock Eval II. Opis metodyki tej analizy podano m.in. w pracach Kotarby i Szafrana (1985) oraz Wilczka i Merty (1992). Dodatkowo, dla części próbek oznaczenie zawartości węgla organicznego wykonano metodą analizy elementarnej na aparacie 1108 EA firmy Carlo Erba wcześniej usuwając z nich węglany. Ekstrakcję bituminów ze skały prowadzono za pomocą aparatu Soxhleta używając jako czynnik ekstrahujący mieszaninę dichlorometan-metanol (93:7 obj.). Asfalteny wydzielono z bituminów przez wytrącanie w heksanie; otrzymane malteny rozdzielono na frakcje węglowodorów nasyconych, węglowodorów aromatycznych i żywic na



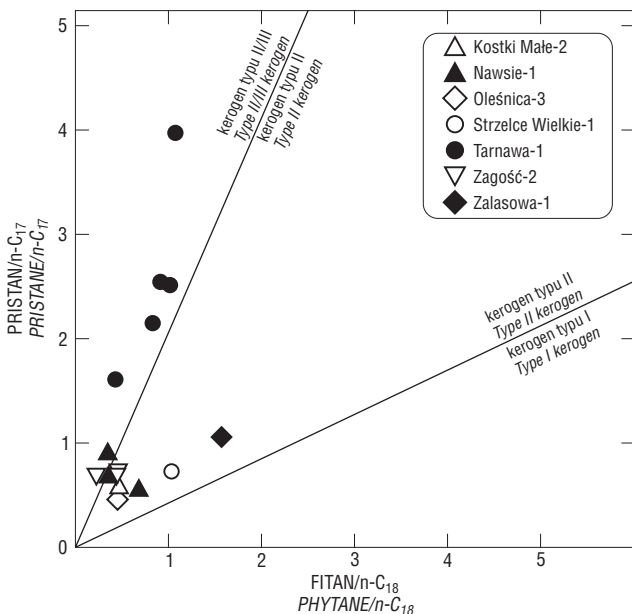
**Ryc. 2.** Przekrój geologiczny rejonu Sędziszów-Rzeszów według Maksyma i in. (1998); Ms — miocen autochtoniczny (sarmat), Mb — miocen autochtoniczny (baden), Fl — flysz karpaccy, Msf — miocen sfałdowany jednostki zgłobickiej, Pg — paleogen, K — kreda, J<sub>3</sub> — jura górna, J<sub>2</sub> — jura środkowa, T — trias, C<sub>1k</sub> — karbon dolny klastyczny, C<sub>1w</sub> — karbon dolny węglanowy, S — sylur, O — ordowik, Pr — prekambry

**Fig. 2.** Geological cross-section of Sędziszów-Rzeszów area after Maksym et al. (1998) Ms — Autochthonous Miocene (Sarmatian), Mb — Autochthonous Miocene (Badenian), Fl — Flysch strata of the Carpathian overthrust, Mst — Folded Miocene of the Zgłobice Unit, Pg — Paleogene, K — Cretaceous, J<sub>3</sub> — Upper Jurassic, J<sub>2</sub> — Middle Jurassic, T — Triassic, C<sub>1k</sub> — Lower Carboniferous (clastic rocks), C<sub>1w</sub> — Lower Carboniferous (carbonates), S — Sylurian, O — Ordovician, Pr — Precambrian



**Ryc. 3.** Diagram potencjalnej macierzystości badanych poziomów utworów jury środkowej na podstawie korelacji zawartości węglowodorów  $C_{15+}$  i całkowitej zawartości węgla organicznego. Klasyfikacja według Hunta (1979) i Leenheer (1984)

**Fig. 3.** Source possibility of Middle Jurassic strata in terms of hydrocarbons and TOC content according to the categories after Hunt (1979) and Leenheer (1984)



**Ryc. 4.** Charakterystyka genetyczna bituminów jury środkowej na podstawie korelacji wskaźników pristan/ $n-C_{17}$  i fitan/ $n-C_{18}$ . Klasyfikacja wg Obermajera i in. (1999)

**Fig. 4.** Genetic characterization of bitumens from Middle Jurassic strata in terms of pristane/ $n-C_{17}$  and phytane/ $n-C_{18}$  according to the categories of Obermajer et al. (1999)

kolumnie chromatograficznej (20 x 0,6 cm, wypełnienie silikażel — tlenek glinu 1: 2 obj.) stosując jako eluenty odpowiednio heksan, benzen i mieszaninę benzen–metanol (1:1 obj.). Dystrybucję  $n$ -alkanów i izoprenoidów oznaczono we frakcji węglowodorów nasyconych metodą

kapilarnej chromatografii gazowej na przyrządzie firmy Hewlett Packard 5890 seria II, wyposażonym w detektor płomieniowo-jonizacyjny (FID) oraz kolumnę HP-1 (25 m x 0,2 mm x 0,5  $\mu$ m). Pomiar składu trwałych izotopów węgla w bituminach, ich poszczególnych frakcjach i kerogenie przeprowadzono metodą ampułkową według Sofera (1980) na spektrometrze masowym MI-1201 lub „on-line” na aparacie Finnigan Delta Plus sprzęgniętym z analizatorem elementarnym Carlo Erba 1108 EA i podano w konotacji  $\delta$  względem wzorca PDB. Błąd oznaczenia  $\delta^{13}C$  wynosi  $\pm 0,2\%$ .

### Metodyka modelowań numerycznych

Zintegrowana analiza naftowa, jako podstawa numerycznych programów modelowań procesów naftowych, została szczegółowo przedstawiona w pracach Ungerera i in. (1990), Doree'a i in. (1993) czy Weltego i in. (1997).

Na powyższych zasadach został opracowany model koncepcyjny programu numerycznego BasinMod<sup>TM</sup>, który zastosowano w rozwiązaniach niniejszego tematu. Poszczególne elementy wykonawcze bloku programowego BasinMod<sup>TM</sup> rozwiązano według powszechnie stosowanych procedur, które dla celów niniejszej analizy są sprowadzone do następujących

ustaleń:

1. Wielkość kompaktacji wydzielonych litotypów skalnych w profilach stratygraficznych analizowanego odwiertu obliczono algorytmem schematu Dykstry (1987);

2. Przewodność cieplną matrycy skalnej określono metodą Deminga & Chapmana (1989) dla każdego kompleksu litostratygraficznego, przy obliczeniu przepuszczalności skał metodą Kozeny-Carmana (Doligez i in., 1986; Ungerer i in., 1990);

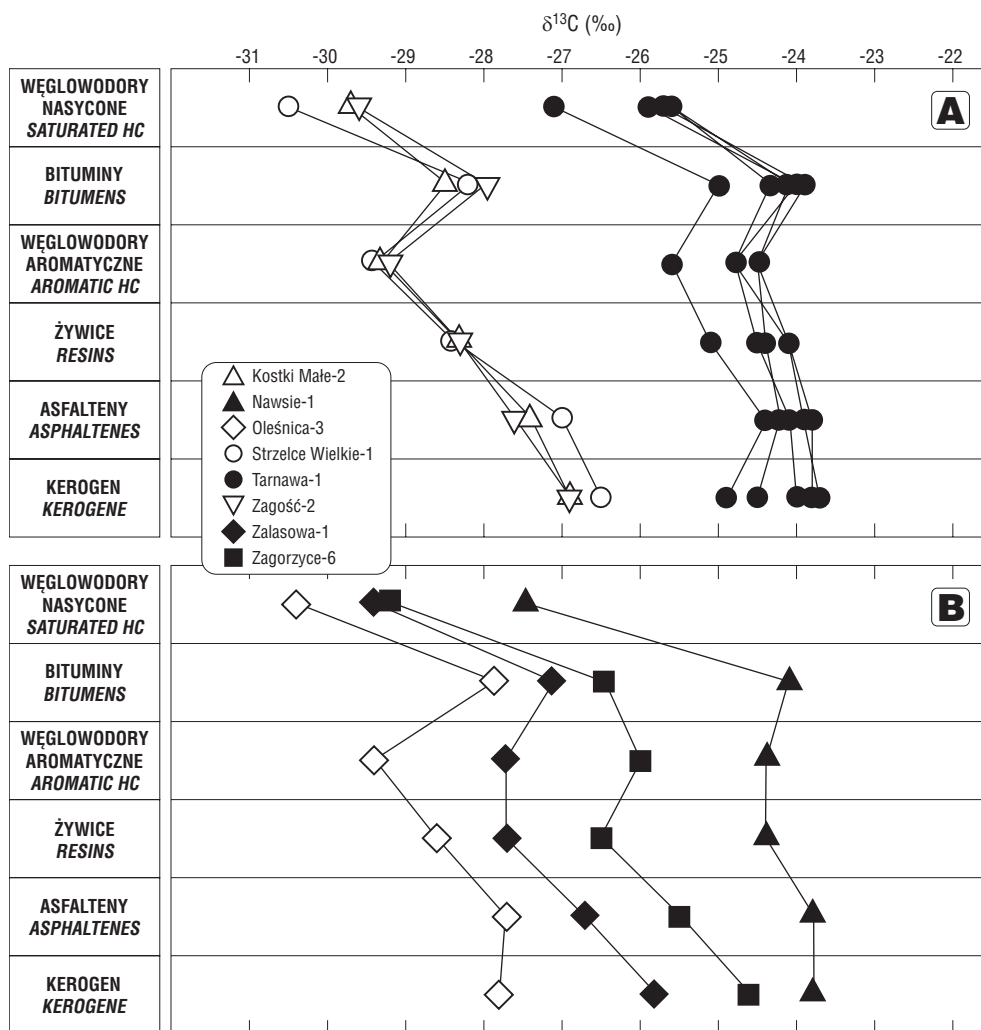
3. Przepływ ciepła obliczono metodą stanu równowagi przejściowej zgodnie z algorytmem zastosowanym w tym programie (BasinMod<sup>TM</sup> Reference Manual, 1987);

4. W rekonstrukcji zmian pola termicznego w analizowanym obszarze wykorzystano wskazania ilościowe długookresowych zmian klimatycznych (np. Yalcin i in., 1997) oraz historię zmian temperatur powierzchniowych poprzez odniesienie globalnych zmian klimatycznych (np. Wygrala, 1989) do zmian pozycji płyty europejskiej (np. Besse & Courtillot, 1991; Van der Voo, 1993; Nawrocki, 1997);

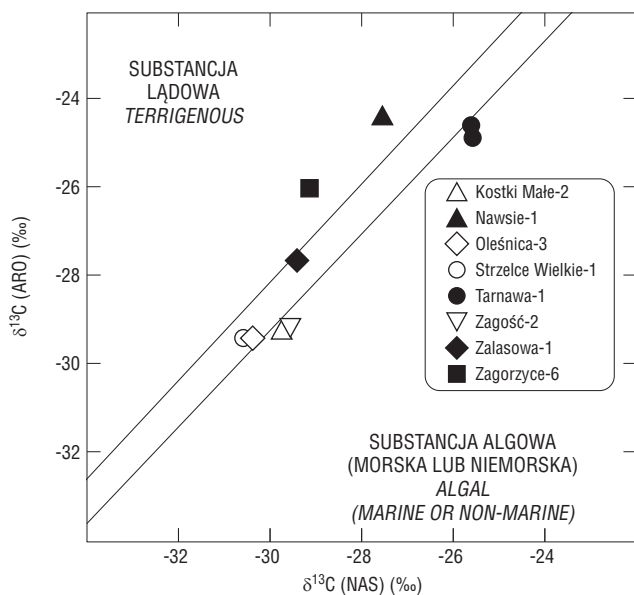
5. Dojrzałość termiczną materii organicznej obliczono metodą EASY % $R_o$  (Sweeney & Burnham, 1990). Generowanie węglowodorów obliczono zgodnie z modelem Lawrence Livermore National Laboratory (Braun & Burnham, 1991), a ekspulsję metodą nasycenia przestrzeni porowej (Ungerer i in., 1988a i b, 1990; Forbes i in., 1991);

6. Granice stratygraficzne wydzielonych warstw i luk stratygraficznych przyjęto według schematu czasu względnego i bezwzględnego tabeli stratygraficznej Gradsteina & Ogg'a (1995).

Zastosowanie powyższych procedur pozwala na uściślenie wielkości podstawowych parametrów procesu generacyjnego i daje wysoki stopień pewności w rekonstrukcji



**Ryc. 5.** Skład trwałych izotopów węgla w bituminach, ich poszczególnych frakcjach i kerogenie. Utwory jury środkowej w strefie (A) Kraków–Brzesko oraz (B) Tarnowa i Rzeszowa  
**Fig. 5.** Stable carbon isotope composition of bitumens, their individual fractions and kerogen. Middle Jurassic strata from (A) Kraków–Brzesko area and (B) Tarnów and Rzeszów areas



**Ryc. 6.** Charakterystyka genetyczna bituminów ekstrahowanych z badanych poziomów jury środkowej na podstawie korelacji składu trwałych izotopów węgla w węglowodorach nasyconych i węglowodorach aromatycznych. Klasyfikacja genetyczna według Sofera (1984)  
**Fig. 6.** Genetic characterization of bitumens from Middle Jurassic strata in terms of  $\delta^{13}\text{C}$  (saturated hydrocarbons) and  $\delta^{13}\text{C}$  (aromatic hydrocarbons) according to the categories of Sofer (1984)

**Tab. 1. Wyniki analizy pirolitycznej Rock Eval**  
Table 1. Results of Rock Eval analysis

Odwiert <i>Well</i>	Interwał opróbowany <i>Sampling interval (m)</i>	TOC (% wag.)			HI (mg HC/g TOC)			PI			T <sub>max</sub> (°C)		
		zakres zmienności <i>range</i>	wartość średnia <i>mean</i>	<i>n</i>	zakres zmienności <i>range</i>	wartość średnia <i>mean</i>	<i>n</i>	zakres zmienności <i>range</i>	wartość średnia <i>mean</i>	<i>n</i>	zakres zmienności <i>range</i>	wartość średnia <i>mean</i>	<i>n</i>
Strefa Kraków–Brzesko <i>Kraków–Brzesko area</i>													
Kostki Małe–2*	1075,5–1078,4	0,58–0,59	0,59	4	32–45	40	4	0,04–0,14	0,10	4	420–424	423	4
Strzelce Wielkie–1*	1415,1–1458,5	0,02–0,36	0,19	2	62		1	0,27		1	424		1
Tarnawa–1	2963,1–3005,0	0,05–15,7	6,6	15	62–467	264	13	0,02–0,10	0,04	14	407–430	420	14
Zagość–2*	1134,4–1146,5	0,60–0,68	0,63	12	23–82	35	12	0,00–0,14	0,08	12	418–422	421	12
Strefa Tarnowa <i>Tarnów area</i>													
Oleśnica–3*	1579,6–1580,5	0,33	0,33	2	79–121	100	2	0,07–0,30	0,23	2	427–430	428	2
Zalasowa–1	3584,5–3672,0	0,00–1,6	0,52	3	38		1	0,03		1	429		1
Strefa Rzeszowa <i>Rzeszów area</i>													
Będziennica–2	4035,0 –4081,0	0,35–3,0	1,3	15	28–150	85	15	0,04–0,37	0,11	15	432–445	441	15
Nawsie–1	4492,0–4601,0	0,74–3,8	2,8	3	22–104	65	3	0,05–0,08	0,06	3	438–441	440	3
Zagorzyce–6	3985,0	1,5		1	54		1	0,05		1	438		1

TOC — całkowita zawartość węgla organicznego, HI — wskaźnik wodorowy, PI — wskaźnik produktywności, T<sub>max</sub> — temperatura maksimum pików S<sub>2</sub>, *n* — liczba próbek, HC — węglowodory, \* — wartości TOC oznaczone na analizatorze elementarnym EA 1108 TOC — total organic carbon (wt. %), HI — hydrogen index, PI — production index, T<sub>max</sub> — temperature of maximum of S<sub>2</sub> peak, *n* — number of samples, HC — hydrocarbons, \* — values of TOC measured by means of EA 1108 elemental analyser

**Tab. 2. Wskaźniki geochemiczne obliczone na podstawie dystrybucji n-alkanów i izoprenoidów**  
Table 2. Geochemical indices calculated from distribution of the n-alkanes and isoprenoids

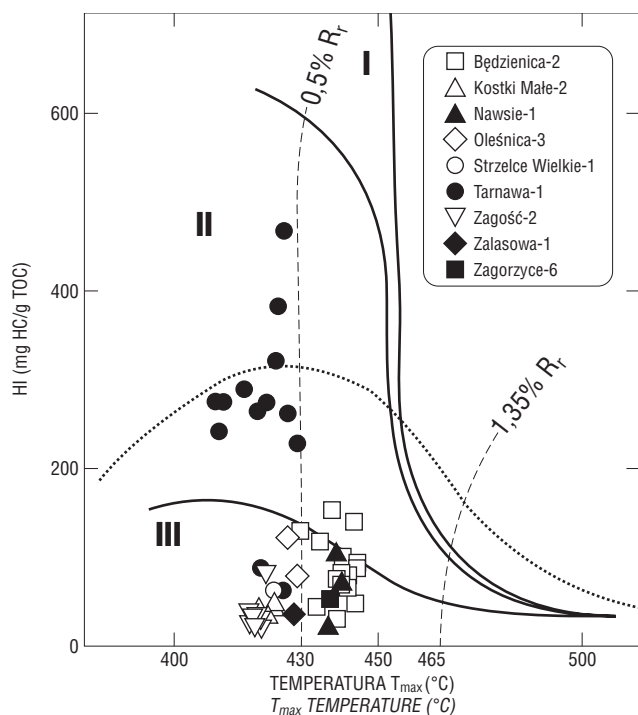
Odwiert <i>Well</i>	Głębokość <i>Depth (m)</i>	CPI <sub>(Total)</sub>	CPI <sub>(17-23)</sub>	CPI <sub>(25-31)</sub>	Pr/Ph	Pr/n–C <sub>17</sub>	Ph/n–C <sub>18</sub>
Strefa Kraków–Brzesko <i>Kraków–Brzesko area</i>							
Kostki Małe–2	1075,5	1,28	1,03	1,54	0,53	0,54	0,44
Strzelce Wielkie–1	1458,5	1,04	1,08	0,96	0,11	0,69	1,01
Tarnawa–1	2985,0	1,79	1,53	1,75	0,96	2,53	1,02
Tarnawa–1	2987,0	2,05	1,66	2,04	0,95	2,57	0,92
Tarnawa–1	2989,3	1,80	1,56	1,85	3,14	2,14	0,79
Tarnawa–1	2990,1	1,86	1,54	1,84	1,11	1,63	0,44
Tarnawa–1	2992,8	2,02	1,69	2,08	2,90	3,95	1,04
Zagość–2	1138,6	1,26	1,02	1,47	0,96	0,69	0,42
Zagość–2	1144,0	1,28	1,01	1,57	0,88	0,67	0,42
strefa Tarnowa <i>Tarnów area</i>							
Oleśnica–3	1579,6	1,06	1,04	1,08	0,99	0,45	0,43
Zalasowa–1	3672,0	1,43	1,07	1,73	0,66	1,03	1,55
strefa Rzeszowa <i>Rzeszów area</i>							
Nawsie–1	4492,0	1,02	1,02	1,02	0,24	0,53	0,66
Nawsie–1	4529,0	1,04	1,00	1,20	2,29	0,87	0,32
Nawsie–1	4601,0	0,98	0,95	1,04	1,18	0,65	0,32

CPI<sub>(Total)</sub> = [(C<sub>17</sub>+C<sub>19</sub>+...+C<sub>27</sub>+C<sub>29</sub>)+(C<sub>19</sub>+C<sub>21</sub>+...+C<sub>29</sub>+C<sub>31</sub>)]/2\*(C<sub>18</sub>+C<sub>20</sub>+...+C<sub>28</sub>+C<sub>30</sub>) (Kotarba i in., 1994)

CPI<sub>(17-23)</sub> = [(C<sub>17</sub>+C<sub>19</sub>+C<sub>21</sub>)+(C<sub>19</sub>+C<sub>21</sub>+C<sub>23</sub>)]/2\*(C<sub>18</sub>+C<sub>20</sub>+C<sub>22</sub>) (Kotarba i in., 1994)

CPI<sub>(25-31)</sub> = [(C<sub>25</sub>+C<sub>27</sub>+C<sub>29</sub>)+(C<sub>27</sub>+C<sub>29</sub>+C<sub>31</sub>)]/2\*(C<sub>26</sub>+C<sub>28</sub>+C<sub>30</sub>) (Kotarba i in., 1994)

Pr — pristan, Ph — fitan



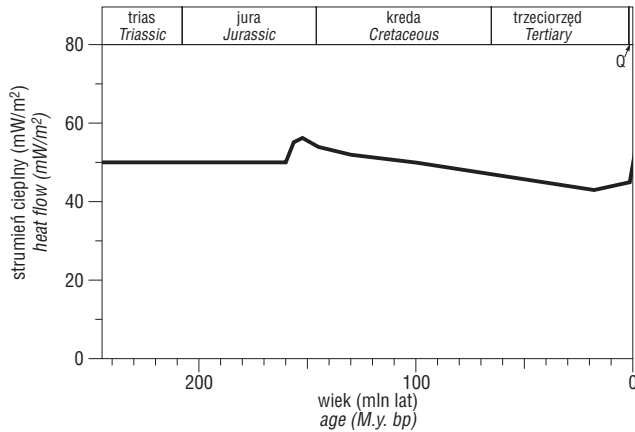
**Ryc. 7.** Korelacja pomiędzy wskaźnikiem wodorowym a temperaturą  $T_{max}$ . Krzywe przeobrażenia poszczególnych typów kerogenu i zakresy dojrzałości termicznej oraz linia kropkowa wyznaczająca górny zasięg pasma przeobrażenia węglistych lamin i soczewek materii organicznej III typu wg Espitalie i in. (1985)

**Fig. 7.** Hydrogen index vs.  $T_{max}$  temperature. Maturation paths for kerogens and dotted line meaning upper range of transformation of type III organic matter (carbonaceous lamines and lenses) after Espitalie et al. (1985)

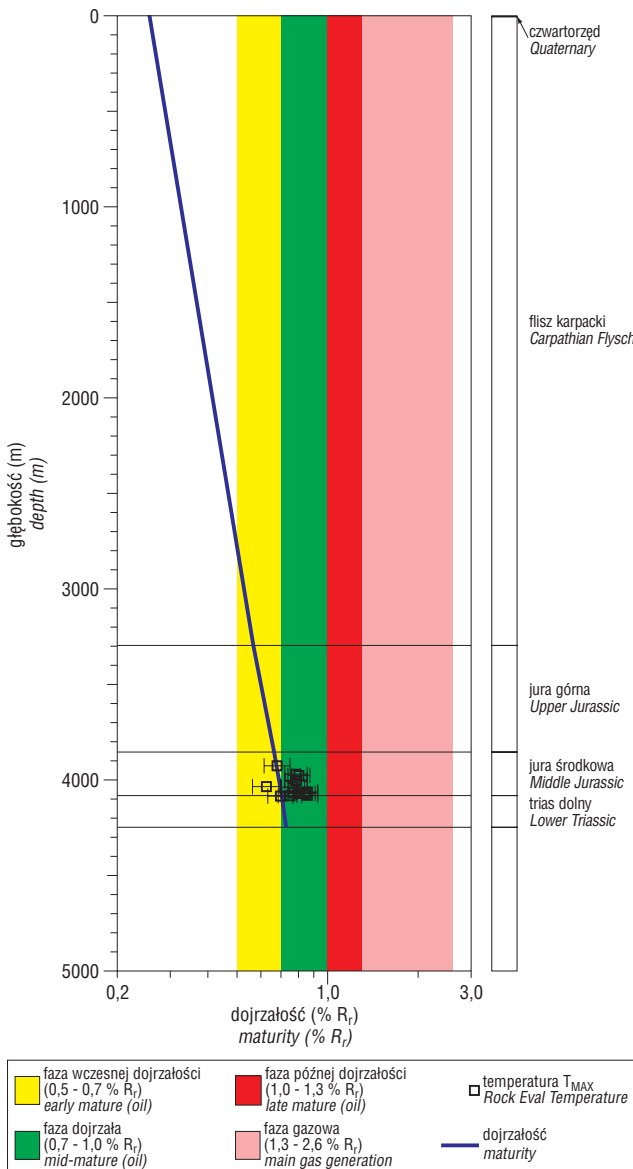
**Tab. 3.** Zawartość, skład grupowy i trwałych izotopów węgla bituminów, ich poszczególnych frakcji i kerogenu  
 Table 3. Bitumens content, fractions and stable carbon isotope composition of bitumens, their fractions and kerogen

Odwiert Well	Głębokość Depth (m)	Bituminy Bitumens (ppm)	Skład grupowy bituminów (% wag.) Fractions (wt. %)				Wskaźniki Indices		Skład trwałych izotopów węgla $\delta^{13}C$ (‰) Stable carbon isotope composition						
			W.Nas.	W.Aro.	Żywice	Asfalteny	wb	ww	W.Nas.	Bituminy	W.Aro.	Żywice	Asfalteny	Kerogen	
Strefa Kraków–Brzesko <i>Kraków–Brzesko area</i>															
Kostki Małe-2	1075,5	150	13	12	58	17	26	6	-29,7	-28,4	-29,3	-28,3	-27,4	-26,9	
Strzelce Wielkie-1	1458,5	220	12	15	29	44	62	17	-30,5	-28,2	-29,4	-28,4	-27,0	-26,5	
Tarnawa-1	2985,0	17610	3	5	6	86	154	12	-25,9	-24,0	-24,8	-24,1	-23,9	-23,7	
Tarnawa-1	2987,0	1480	10	14	24	52	136	33	-27,1	-25,0	-25,6	-25,1	-24,4	-24,9	
Tarnawa-1	2989,3	12610	5	12	8	75	117	20	-25,6	-24,1	-24,5	-24,4	-24,2	-24,5	
Tarnawa-1	2990,1	8450	3	7	11	79	149	15	-25,7	-23,9	-24,5	-24,1	-23,8	-23,8	
Tarnawa-1	2992,8	13160	4	13	8	75	137	23	-25,6	-24,3	-24,8	-24,5	-24,1	-24,0	
Zagość-2	1134,4	150	13	10	54	23	23	5	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	
Zagość-2	1138,6	180	16	16	42	26	26	8	-29,6	-23,8	-29,2	-28,3	-27,6	-26,9	
Zagość-2	1144,0	170	13	14	45	28	28	7	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	
Strefa Tarnowa <i>Tarnów area</i>															
Oleśnica-3	1579,6	250	20	20	29	31	76	30	-30,4	-28,8	-29,4	-28,6	-27,7	-27,8	
Zalasowa-1	3672,0	200	9	10	40	41	13	2	-29,4	-27,4	-27,7	-27,7	-26,7	-25,8	
Strefa Rzeszowa <i>Rzeszów area</i>															
Nawsie-1	4492,0	180	12	12	44	32	24	6	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	
Nawsie-1	4529,0	1680	3	17	20	60	44	9	-27,5	-24,1	-24,4	-24,4	-23,8	-23,8	
Nawsie-1	4601,0	1210	4	24	25	47	32	9	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	
Zagorzyce-6	3985,0	390	7	20	23	50	27	7	-29,2	-26,1	-26,0	-26,5	-25,5	-24,6	

W.Nas. — węglowodory nasycone, W.Aro. — węglowodory aromatyczne, wb — wskaźnik bitumiczny (mg bituminów/g TOC), ww — wskaźnik węglowodorowy [mg (W.Nas. + W.Aro.)/g TOC], n.a. — nie analizowano, W.Nas. — saturated hydrocarbons, W.Aro. — aromatic hydrocarbons, Żywice — resins, Asfalteny — asphaltenes, wb — bitumen ratio (mg bitumens/g TOC), ww — hydrocarbon ratio [mg (W.Nas. + W.Aro.)/g TOC], n.a. — not analysed



Ryc. 8. Model ewolucji strumienia ciepłego w analizowanym profilu odwiertu Będzienia-2. Q — czwartorzęd  
Fig. 8. Heat flow evolution in profile of Będzienia-2 well. Q — Quaternary



Ryc. 9. Krzywa kalibracyjna modelu termiczno-erozyjnego odwiertu Będzienia-2  
Fig. 9. Calibration curve thermal-erosion model for Będzienia-2 well

rozkładu faz generacyjnych i ilościowych wskaźników potencjału węglowodorowego rozważanego kompleksu macierzystego.

### Geochemiczna kwalifikacja materii organicznej skał macierzystych jury środkowej

Podstawowym materiałem do geochemicznej kwalifikacji utworów jury środkowej są wyniki badań analitycznych 57 próbek skał potencjalnie macierzystych z profili 9 odwiertów rozmieszczonych w trzech strefach ich występowania w Polsce południowo-wschodniej (tab. 1, ryc. 1):

□ w strefie Kraków-Brzesko: Kostki Małe-2 (4 próbki), Strzelce Wielkie-1 (2 próbki), Tarnawa-1 (15 próbek) i Zagość-2 (12 próbek),

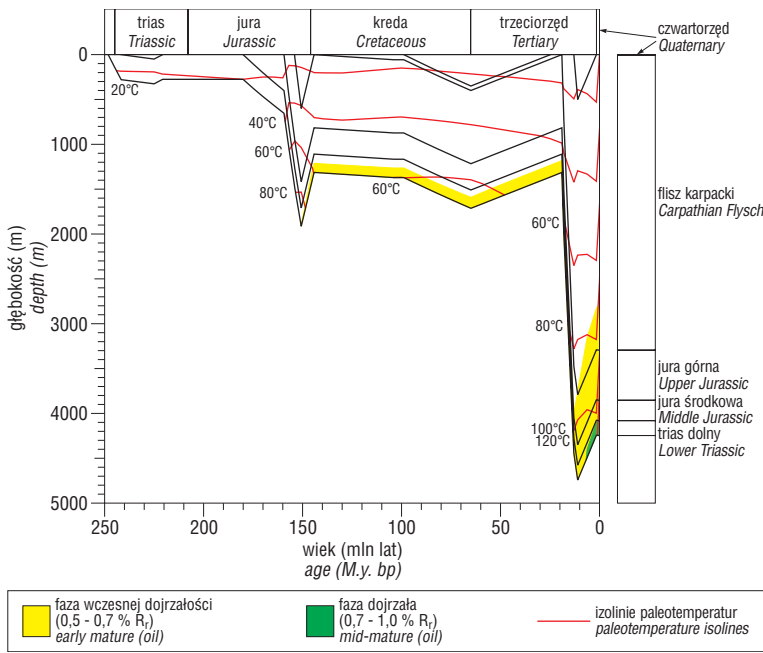
□ w strefie Tarnowa: Oleśnica-3 (2 próbki) i Zalasowa-1 (3 próbki),

□ w strefie Rzeszowa: Będzienia-2 (15 próbek), Nawsie-1 (3 próbki) i Zagorzyce-6 (1 próbka).

Niewielka populacja próbek, z dwóch profili odwiertów, którą pobrano w strefie Tarnowa, spowodowała, że jej charakterystykę geochemiczną przedstawiono wspólnie ze strefą Kraków-Brzesko.

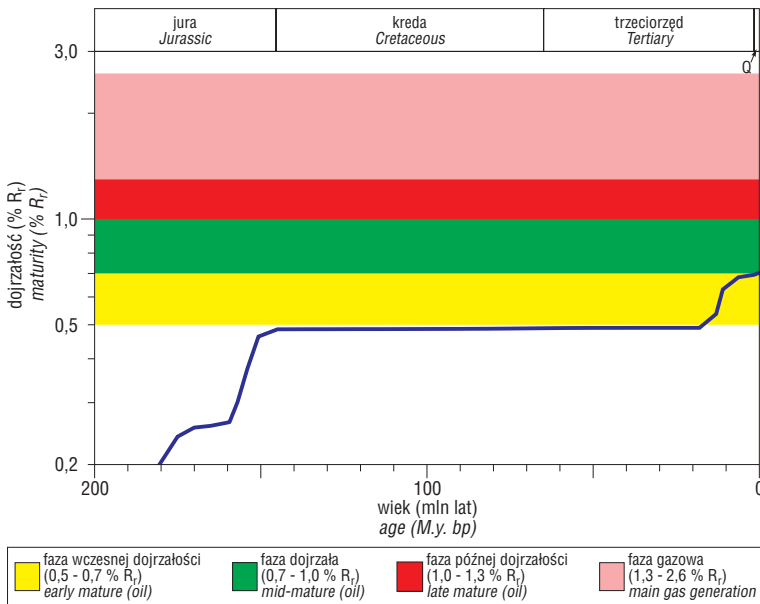
Zawartość węgla organicznego rozproszonej materii organicznej w utworach jury środkowej wynosi w strefie Kraków-Brzesko i w strefie Tarnowa od 0,0 do 0,68% wag. (tab. 1), przy pojedynczym wskazaniu w odwiercie Zalasowa-1 — 1,6% wag. Rezydualny potencjał genetyczny tych utworów jest bardzo niski i nie przekracza 1 mg HC/g skały (tab. 1). Wysoka zawartość węgla organicznego, w ilości do 16% wag., stwierdzona (tab. 1) w profilu odwiertu Tarnawa-1 (Kotarba i in., 2001), przy wysokiej wartości potencjału genetycznego kerogenu —  $S_2$  (tab. 1) oraz dużej zawartości ekstrahowalnych węglowodorów (ryc. 3), może być związana z obecnością wkładek węglistych w postaci lamin i soczewek. Typ materii organicznej badanych utworów, leżących przed nasunięciem karpackim (odwiert Kostki Małe-2, Oleśnica-3, Strzelce Wielkie-1 i Zagość-2) jest mieszany, morsko-łądowy (kerogen II/III), o czym świadczą wyniki dystrybucji n-alkanów i izoprenoidów (tab. 2, ryc. 4) oraz analizy składu trwałych izotopów węgla (tab. 3, ryc. 5, 6). Nieznaczna zawartość materii organicznej oraz jej niski potencjał węglowodorowy powoduje, że identyfikacja typu kerogenu za pomocą metody Rock Eval nie jest jednoznaczna (ryc. 7). W profilach odwiertów Tarnawa-1 i Zalasowa-1, leżących pod nasunięciem karpackim dominuje gazotwórczy kerogen III typu (ryc. 4-7). Stwierdzone podwyższone wartości wskaźnika wodorowego (ryc. 7), charakterystyczne dla ropotwórczego kerogenu II typu, wynikają prawdopodobnie z obecności macerałów bogatych w wodór (Kotarba i in., 2001). Wskaźnik dojrzałości termicznej  $T_{max}$  przyjmujący wartości poniżej 430°C (tab. 1, ryc. 7) świadczy, że profil utworów doggeru w tych strefach nie osiągnął granicznego przedziału generowania węglowodorów. Z tego względu dalsza analiza naftowa pomija w rozważaniach potencjału węglowodorowego profile odwiertów w strefach Kraków-Brzesko i Tarnowa.

W strefie Rzeszowa zawartość TOC w utworach terygenicznym jury środkowej wynosi od 0,27 do 3,8% wag. (tab. 1), przy średniej arytmetycznej 1,5% wag. Niski rezydualny potencjał genetyczny, nie przekraczający 5 mg



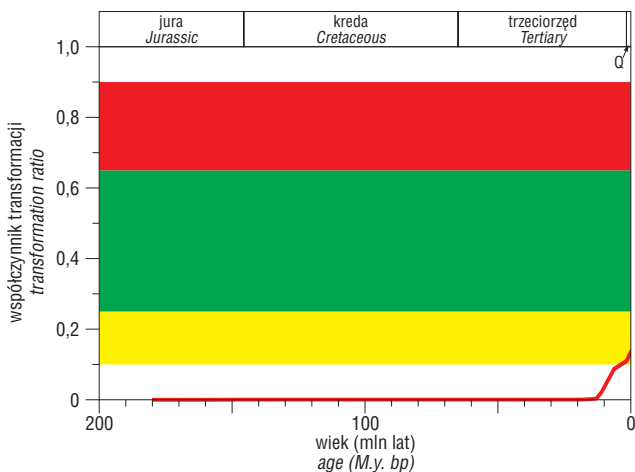
Ryc. 10. Krzywe pograżania wydzielonych kompleksów litostratygraficznych z przedziałami dojrzałości termicznej kerogenu w profilu odwiertu Będzienia-2

Fig. 10. Burial history curves for selected lithostratigraphic complexes with thermal maturity zones in profile of Będzienia-2 well



Ryc. 11. Krzywa ewolucji dojrzałości w profilu odwiertu Będzienia-2. Q — czwartorzęd

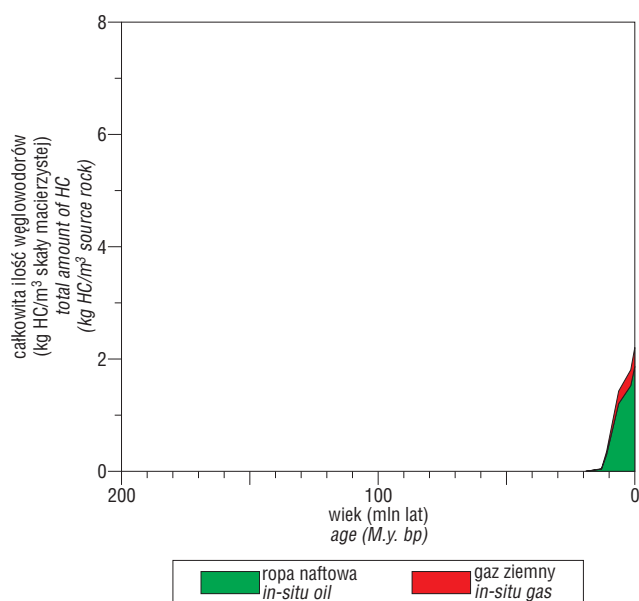
Fig. 11. Maturity evolution curve in profile of Będzienia-2 well. Q — Quaternary



Ryc. 12. Stopień transformacji kerogenu w utworach jury środkowej odwiertu Będzienia-2. Q — czwartorzęd

Fig. 12. Transformation ratio of kerogen in Middle Jurassic strata in Będzienia-2 well. Q — Quaternary





**Ryc. 13.** Całkowita ilość węglowodorów wygenerowanych z poziomów skał macierzystych jury środkowej w odwiercie Będzienia-2. Q — czwartorzęd

**Fig. 13.** Total amount of hydrocarbons generated from Middle Jurassic source rocks in Będzienia-2 well. Q — Quaternary

HC/g skały i związana z nim wielkość wskaźnika wodorowego HI do 150 mg HC/g TOC oraz zawartość węglowodorów  $C_{15+}$  wskazują, że utwory jury środkowej należy zaliczyć do klasy średniej macierzystości (ryc. 3). O dominacji gazotwórczego kerogenu III typu świadczą wyniki badań Rock Eval (ryc. 7), prostych biomarkerów (tab. 2, ryc. 4) oraz składu trwałych izotopów węgla (tab. 3, ryc. 5 i 6). Wskaźnik dojrzałości termicznej materii organicznej  $T_{max}$  oscyluje w granicach 440 °C (tab. 1, ryc. 7), co dowodzi wejścia profilu jury środkowej tej strefy w przedział generacyjny początku okna ropnego.

#### Identyfikacja faz węglowodorowych i czasu ich powstania

Wyniki geochemicznych badań analitycznych, a szczególnie ocena stopnia przeobrażenia substancji organicznej skał macierzystych jury środkowej, wykazały, że jedynie w strefie Rzeszowa mogły zaistnieć sprzyjające warunki do wytworzenia węglowodorów. Do szczegółowej analizy procesów ropotwórczych wybrano profil odwiertu Będzienia-2 (ryc. 1).

Analizę naftową utworów jury środkowej oparto na regionalnych warunkach paleotermicznych (Kuśmirek, 1995; Poprawa i in., 2001), na podstawie których odtworzono model ewolucji strumienia cieplnego (ryc. 8). Model ten skalibrowano wartościami temperatury  $T_{max}$  (ryc. 9).

Wyniki modelowań numerycznych w profilu odwiertu Będzienia-2 wykazały, że skały macierzyste w utworach jury środkowej, do czasu nasunięcia Karpat fliszowych na przedpole mioceńskie, nie uzyskały dojrzałości termicznej wstępnej fazy generacyjnej (ryc. 10 i 11). W etapie nasuwania Karpat fliszowych następuje przyrost dojrzałości

termicznej materii organicznej do poziomu wstępnej fazy dojrzałości termicznej ( $R_t = 0,5-0,7\%$ ), przy głębokości pogrążenia 2150 m i temperaturze 60–70 °C (ryc. 10). Powyższy stan dojrzałości termicznej utworów jury środkowej został zachowany do czwartorzędu włącznie, przy stopniu transformacji organicznej nie przekraczającym 15% (ryc. 12).

#### Ocena potencjału węglowodorowego

Modelowanie kinetyczne warunków generowania i ekspulsji węglowodorów w analizowanym profilu odwiertu Będzienia-2 wykazało, że skały macierzyste jury środkowej weszły w przedział generacyjny fazy wczesnej z wykorzystaniem 10–25% swojego całkowitego potencjału (ryc. 12).

Obliczony na tej podstawie potencjał generacyjny 1 m<sup>3</sup> skały macierzystej wynosi 2,1 kg węglowodorów (ryc. 13), przy nie osiągniętym progu ekspulsji.

#### Podsumowanie

Analiza organo-geochemiczna utworów jury środkowej Polski południowo-wschodniej wykazała niską zawartość węgla organicznego w skali regionalnej ze znacznym przyrostem w strefie rzeszowskiej i w profilu odwiertu Tarnawa-1. Materia organiczna utworów jury środkowej ma charakter mieszany — kerogen typu II/III w strefie Kraków-Brzesko i w strefie Tarnowa oraz łądowy — kerogen typu III w strefie rzeszowskiej. Stopień dojrzałości kerogenu, określony temperaturą  $T_{max}$ , kwalifikuje skały macierzyste jury środkowej strefy Kraków-Brzesko i strefy Tarnowa jako niedojrzałe do generowania węglowodorów, a w strefie Rzeszowa lokuje je w przedziale generacyjnym początku okna ropnego.

Na podstawie powyższych wyników analizy macierzystości utworów jury środkowej Polski południowo-wschodniej, modelowanie potencjału węglowodorowego można było odnieść jedynie do profilu jury środkowej w strefie rzeszowskiej. Analiza dojrzałości termicznej materii organicznej i kinetycznej transformacji kerogenu w profilu odwiertu Będzienia-2 wykazała, że w najbardziej pogrążonej strefie jury środkowej nie został wytworzony znaczący potencjał generacyjny i nie został osiągnięty próg ekspulsji węglowodorów. Ze względu na niski gradient termiczny nasuniętego fliszu karpaccyjskiego warunki efektywnej ropotwórczości utworów jury środkowej wymagają pogrążenia skał macierzystych na większe głębokości, najprawdopodobniej poniżej 5000 m. Badania geochemiczne wykazały, że źródłem ropy naftowej, akumulowanej w utworach górnej kredy i górnej jury podłoża, są skały macierzyste zawarte zarówno w obrębie fliszu Karpat, jak i w samym podłożu (ten Haven i in., 1993; Kotarba & Koltun, 2003). W tej sytuacji rozpoznana składowa mezozoiczna tych rop może wskazywać na dopływ z głęboko pogrążonych pod nasunięciem karpaccyjskim środkowojurajskich skał macierzystych zawierających

ropotwórczy kerogen II typu w strefach Kraków–Brzesko i Tarnów.

Niniejsza publikacja jest oparta na wynikach uzyskanych w trakcie realizacji badań statutowych numer 11.11.140.969, finansowanych przez Komitet Badań Naukowych i wykonanych w Zakładzie Surowców Energetycznych Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Autorzy dziękują A. Maksymowi, B. Liszce, M. Pietrusiak i G. Staryszakowi z Polskiego Górnictwa Naftowego i Gazownictwa S.A. za udostępnienie materiałów niepublikowanych.

### 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. *J. Geophys. Res.*, 96 (B3): 4029–4050.
- BRAUN R.L. & BURNHAM A.K. 1991 — User's manual for PMOD, a pyrolysis and primary migration model. Lawrence Livermore National Laboratory Report, UCRL-MA-1077789.
- DAYCZAK-CALIKOWSKA K. & KOPIK J. 1973 — Budowa geologiczna Polski, t. 1, cz. 2, Stratygrafia: 237–272.
- DAYCZAK-CALIKOWSKA K. & MORYC W. 1988 — Rozwój basenu sedimentacyjnego i paleotektonika jury środkowej na obszarze Polski. *Kwart. Geol.*, 32: 117–136.
- 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 P. & CHENET P.Y. 1986 — Integrated numerical modelling of sedimentation, heat transfer, hydrocarbon formation and fluid migration in sedimentary basin. [In:] Burruss J. (ed.) — *Thermal modelling in Sedimentary Basins*. Technip, Paris: 173–195.
- DOREE A.G., AUGUSTSON J.H., HERMANRUD C., STEWART D.J. & SYLTA O. (eds) 1993 — *Basin Modelling: Advances and Applications*. NPF Special Publication 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.
- ESPITALIÉ J., DEROO G. & MARQUIS F. 1985 — La pyrolyse Rock Eval et ses applications. *Revue IAPF*, 40–41: 563–579 i 755–784.
- FORBES P.L., UNGERER P., 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.
- GRADSTEIN F.M. & OGG J.G. 1995 — A Phanerozoic time scale. *Episodes*, 19: 3–5.
- TEN HAVEN H.L., LAFARGUE E. & KOTARBA M. 1993 — Oil/oil and oil/source rock correlations in the Carpathian Foredeep and overthrust, south–east Poland. *Org. Geochem.*, 20: 935–959.
- HUNT J.M. 1979 — *Petroleum geology and geochemistry*. W.H. Freeman and Company, San Francisco.
- JAWOR E. 1970 — Węglona budowa geologiczna na wschód od Krakowa. *Acta Geol. Pol.*, 20: 709–762.
- KOTARBA M.J. & KOLTUN Y.U. 2003 — The origin and habitat of hydrocarbons in the Polish and Ukrainian parts of the Carpathian Province. [In:] Golonka J. & Picha F. (eds) — *The Carpathians: geology and hydrocarbon resources*. AAPG Memoir (in press).
- KOTARBA M. & SZAFRAN S. 1985 — Zastosowanie analizatorów Rock Eval i Oil Show w poszukiwaniach naftowych. *Nafta*, 3: 81–88.
- KOTARBA M., KOWALSKI A. & WIĘCŁAW D. 1994 — Nowa metoda obliczeń wskaźnika CPI i wykorzystanie badań dystrybucji n-alkanów i izoprenoidów w prospekcji naftowej. *Mat. Symp. Badania geochemiczne i petrofizyczne w poszukiwaniach ropy naftowej i gazu ziemnego*. Balice k/Krakowa, 27–28.06.1994. Wyd. IGNiG Kraków: 82–92.
- KOTARBA M.J., WAGNER M., WIĘCŁAW D., KOSAKOWSKI P. & KOWALSKI A. 2001 — Potencjał węglowodorowy i charakterystyka geochemiczna substancji organicznej w profilu otworu Tarnawa–1. [W:] Matyja H. (red.), *Paleozoik podłoża centralnej części polskich Karpat zewnętrznych (rejon Liplas–Tarnawa)*. Pr. Państw. Inst. Geol., 174: 161–172.
- KUŚMIEREK J. 1995 — Geodynamiczny scenariusz formowania się systemu naftowego. [In:] Kuśmierk J. (red.) — *Ewolucja a roponość Karpat polskich*. Pr. Geol. PAN, Oddz. w Krakowie, 138: 47–53.
- LEENHEER M.J. 1984 — Mississippian Bakken and equivalent formations as source rocks in the western Canadian basins. *Org. Geochem.*, 6: 521–532.
- MAKSYM A., LISZKA B., PIETRUSIAK M. & STARYSZAK G. 1998 — Analiza geologiczno-geofizyczna utworów autochtonicznych miocenu i jego podłoża w rejonie Sędziszów–Rzeszów–Zalasia. Etap I — Podłoże trzeciorzędu. *Arch. PGNiG, BG Geonafta, Jasło (materiały niepublikowane)*.
- MORYC W. 1992 — Budowa geologiczna utworów podłoża miocenu w rejonie Sędziszów Młp.–Rzeszów i ich perspektywność. *Nafta–Gaz*, 48: 206–223.
- MORYC W. 1996 — Budowa geologiczna podłoża miocenu w rejonie Pilzno–Dębica–Sędziszów Młp. *Nafta–Gaz*, 52: 521–550.
- NAWROCKI J. 1997 — Permian to Early Triassic magnetostratigraphy from the Central European basin in Poland: Implications on regional and worldwide correlation. *Earth & Planetary Sc. Lett.*, 152: 37–58.
- OBERMAJER M., FLOWER M.G. & SNOWDON L.R. 1999 — Depositional environment and oil generation in Ordovician source rocks from southwestern Ontario, Canada. *Organic geochemical and petrological approach*. AAPG Bull., 83: 1426–1453.
- POPRAWA P., NARKIEWICZ K., SWADOWSKA E. & BRUSZEWSKA B. 2001 — Analiza dojrzałości oraz jednowymiarowe modelowanie historii termicznej utworów potencjalnie macierzystych dla węglowodorów w rejonie Liplas–Tarnawa. Pr. Państw. Inst. Geol., 174: 173–204.
- SOFER Z. 1980 — Preparation of carbon dioxide for stable isotope analysis of petroleum. *Anal. Chem.*, 52: 1389–1391.
- SOFER Z. 1984 — Stable carbon isotope composition of crude oils: application to source depositional environments and petroleum alteration. *AAPG Bull.*, 68: 31–49.
- STEMULAK J. & JAWOR E. 1963 — Węglona budowa geologiczna przedgórza Karpat w obszarze na zachód od Dunajca i Wisły. *Kwart. Geol.*, 7: 169–186.
- SWEENEY J.J. & BURNHAM A.K. 1990 — Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics. *AAPG Bull.*, 74: 1559–1570.
- 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. Sci.*, 2: 927–934.
- UNGERER P., BEHAR F., VILLALBA M., HEUM O.R. & AUDIBERT A. 1988b — Kinetic modelling of oil cracking. *Adv. Org. Geochem.*, 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. *AAPG Bull.*, 74: 309–335.
- URBANIEC & ZACHARSKI J. 2002 — Mapa strukturalna stropu utworów jury środkowej. *Arch. PGNiG, BG Geonafta, Kraków (materiały niepublikowane)*.
- VAN DER VOO R. 1993 — *Paleomagnetism of the Atlantic, Tethys and Iapetus Oceans*. Cambridge Univ. Press.
- WELTE D.H., HORSFIELD B. & BAKER D.R. (eds) 1997 — *Petroleum and Basin Evolution*, Springer–Verlag.
- WILCZEK T. & MERTA H. 1992 — Wstępne wyniki badań pirolitycznych metodą Rock–Eval. *Nafta*, 48: 3–10.
- WYGRALA B. 1989 — Integrated study of an oil field in the southern Po Basin, northern Italy. *Berichte der Forschungszentrum — Julich, Julich, Germany*, 2313.