



Obliczanie ciepła radiogenicznego osadów cechsztynu i karbonu na podstawie danych geofizyki otworowej w rejonie rafy Brońsko

Maria Bała¹, Marta Waliczek¹



M. Bała

M. Waliczek

Radiogenic heat of Zechstein and Carboniferous rocks calculated using well-logging data from the Brońsko Reef area. *Prz. Geol.*, 60: 155–163.

Abstract. Rocks characterized by an increased kerogene transformation ratio, which is an important indicator of hydrocarbon generation in petroleum exploration, generate more radiogenic heat as well. The goal of this paper was to evaluate radiogenic heat (A) in several boreholes drilled through Zechstein and Carboniferous deposits of the Brońsko Reef. Based on spectral gamma ray and Litho-Density Logs measurements, the quantitative concentration of radioactive elements including uranium, thorium and radioactive isotope of potassium (⁴⁰K) was evaluated. These data along with bulk density were subsequently used to calculate the radioactive heat. The calculations were performed for boreholes B-2, B-3, B-4 and B-8,

located in central part of the reef. Increased values of A appeared characteristic for the Main Dolomite, Zechstein limestone and Carboniferous deposits with high share of shales.

Keywords: radiogenic heat, spectral gamma ray, well logging, source rocks

Ciepło radiogeniczne (A), będące składową gęstości strumienia ciepłnego Ziemi, powstaje podczas rozpadu pierwiastków promieniotwórczych występujących w skałach. Do najważniejszych z nich należą: szereg promieniotwórczy uranu (²³⁸U) i toru (²³²Th), w mniejszym stopniu aktywność uranu (²³⁵U) oraz izotop promieniotwórczy potasu (⁴⁰K).

Problemem oceny wartości ciepła radiogenicznego zajmowano się od wielu lat. Jego wielkość określano, opierając się na pomiarach laboratoryjnych na próbkach, a także na podstawie danych geofizyki otworowej. Autorami najważniejszych prac z tego zakresu są: Keen i Lewis (1982), Rybach (1986), Cermak i in. (1990), Bücker i Rybach (1996), McKenna i Sharp (1998), Förster & Förster (2000), Waples (2002) oraz Norden & Förster (2006), a w Polsce – Plewa S. (1988), Plewa M. (1994), Ciechanowska i Gąsior (2000) oraz Krawiec (2007a, b).

Ciepło radiogeniczne oblicza się zwykle na podstawie ilościowej koncentracji pomierzonych zawartości uranu, toru i potasu oraz gęstości objętościowej, wykorzystując w tym celu pomiary spektrometryczne gamma oraz profilowania gamma-gamma.

Z punktu widzenia poszukiwań złóż ropy i gazu, skały charakteryzujące się wysoką produkcją ciepła radiogenicznego, a posiadające podwyższoną zawartość uranu, są najczęściej skałami macierzystymi dla węglowodorów. Odtworzenie historii termicznej skał jest ważnym elementem rekonstrukcji procesów generowania i ekspulsji węglowodorów (Kotarba i in., 2006).

KRÓTKI OPIS ZŁOŻA

Złoże Brońsko jest złożem gazu ziemnego znajdującym się w środkowej części monokliny przedsudeckiej. Opisany obszar położony jest w obrębie wyniesienia wolsztyńskiego. Gaz ziemny w złożu Brońsko jest zakumulowany

w rafowych utworach wapienia cechsztyńskiego. Na rycinie 1 zamieszczono fragment mapy stropu wapienia cechsztyńskiego rafy Brońsko z zaznaczonymi otworami, w których wykonywano badania: B-2, B-3, B-4 oraz B-8. W tabeli 1 przedstawiono profil stratygraficzny i litologię w otworze B-3.

Rafę Brońsko rozpoznano 16 otworami, z których używano przemysłowy przepływ gazu. Miąższość wapienia podstawowego w tych otworach waha się od 19 m (B-2) do 91 m (B-3).

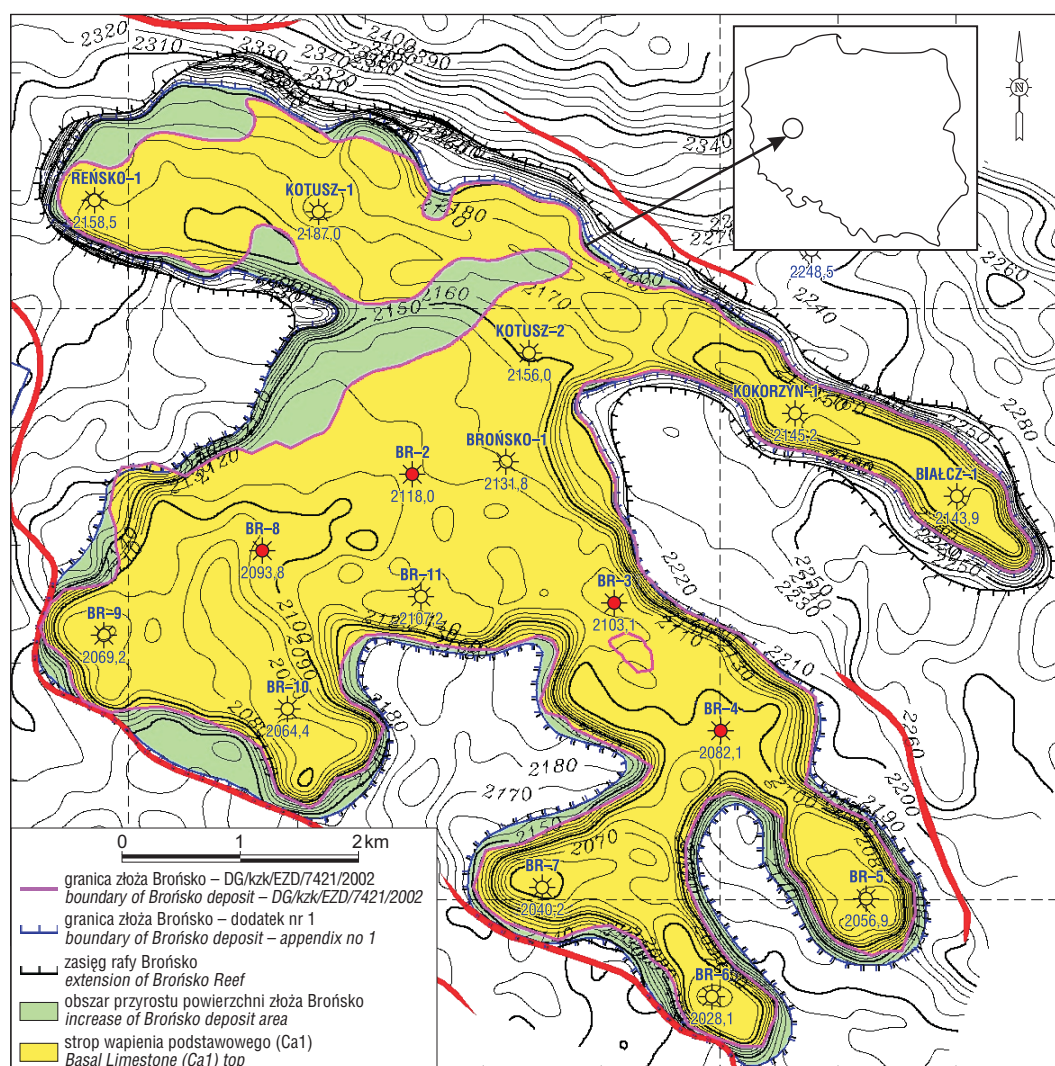
Serię wapienia podstawowego budują przede wszystkim wapień i wapień dolomityczny, przechodzące miejscami w dolomity. Omawiany poziom cechuje się zmiennością facjalną. Zmiany miąższościowo-facjalne wapienia cechsztyńskiego związane są głównie ze zróżnicowaniem głębokości morza cechsztyńskiego w różnych strefach sedimentacji tej serii.

ROLA SKAŁ MACIERZYSTYCH ORAZ ZBIORNIKOWYCH W GENEROWANIU WĘGLOWODORÓW

Według jednej z powszechnie przyjętej teorii ropa naftowa jest pochodzenia organicznego. Jej twórcami byli Radziszewski (1877), Engler i Höfer (1890), a w latach późniejszych również Hackford (1932) i White (1935) (cytowane w wielu pracach, m.in. Karnkowski, 1993). W pierwszej fazie, biochemicznej, gromadząca się w osadach materia organiczna ulega przeobrażeniom na skutek utleniania, hydrolizy oraz działalności mikroorganizmów. Zostaje ona pozbawiona dużej ilości tlenu i azotu, a w zamian zyskuje węgiel i wodór. Powstała substancja nosi nazwę kerogenu.

W momencie przysypania osadu zawierającego przeobrażoną materię (kerogen) rozpoczyna się druga faza

¹Katedra Geofizyki, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; bala@geol.agh.edu.pl.



Ryc. 1. Fragment mapy strukturalnej rafy Brońsko z zaznaczonymi na czerwono otworami wykorzystanymi w badaniach (wg Kuczaka, 2002)

Fig. 1. Part of Brońsko Reef structural map with boreholes used in the study marked by red (after Kuczak, 2002)

tworzenia się węglowodorów – faza geochemiczna. Wiąże się ona z udziałem ciśnienia i temperatury. Sądzi się jednak, że temperatura ma większe znaczenie w generowaniu węglowodorów niż ciśnienie. Już niezbyt wysokie wartości temperatury przyczyniają się do powstawania ciekłych węglowodorów.

Na przebieg przemian wpływają nie tylko procesy bakteryjne, ale również warunki termodynamiczne czy środowisko redukcyjne. Istotną rolę odgrywają także czynniki katalityczne. Katalizatorami mogą być m.in. pierwiastki będące źródłem ciepła radiogenicznego (uran, tor, potas). Produkują one ciepło potrzebne do przemian substancji organicznej, ponadto uran bardzo łatwo ulega utlenianiu, pozbawiając materię organiczną tlenu.

Aby nagromadzona substancja organiczna mogła przeobrazić się w węglowodory, niezbędne jest odpowiednie środowisko. Jeżeli skała zawiera ponadprogową wartość węgla organicznego oraz odpowiednie ilości produktów koniecznych do powstania substancji bitumicznej i węglowodorowej, możemy ją nazwać skałą macierzystą (Levorsen, 1972). Przyjmuje się, że progowymi zawartościami kerogenu, kwalifikującymi uznanie skał za macierzyste, są: > 0,5% dla skał detrytycznych i > 0,3% dla skał węglanowych.

W skałach macierzystych na skutek przeobrażenia nagromadzonej substancji organicznej powstają ropa naftowa i gaz ziemny. Najlepsze cechy skał macierzystych wykazują skały ilaste, drobnoziarniste mułowce i łupki. Są one nieporowate, zwięzłe, zawierają mikrospeknięcia i posiadają własności katalityczne, dzięki czemu przyspieszają proces generowania węglowodorów. Ponadto w wyniku dehydratacji minerałów ilastych podczas diagenety może dojść do ekspulsji, czyli migracji pierwotnej węglowodorów. Przemieszczają się one wówczas do skał zbiornikowych.

Problemem macierzystości utworów dolomitu głównego i wapienia podstawowego zajmowali się m.in. Kotarba i in. (1992, 2000, 2006), Botor i Kosakowski (2000) oraz Kotarba i Wagner (2007).

CIEPŁO RADIOGENICZNE

W czasie rozpadu radioaktywnej masy ulega konwersji w energię, która uwalniana jest jako energia kinetyczna towarzysząca cząstkom lub nukleonom oraz energia towarzysząca emisji promieniowania gamma. Cała energia, poza tą zużytą w trakcie wyrzucania neutrino, jest konwertowana na ciepło. Zmiany termiczne zachodzą w wyniku rozpadów wszystkich nuklidów, jednak tylko szereg pro-

Tab. 1. Stratygrafia i litologia w profilu otworu B-3
Table 1. Stratigraphy and lithology for B-3 well profile

Interwał [m] <i>Interval [m]</i>	Miaższość [m] <i>Thickness [m]</i>	Stratygrafia <i>Stratigraphy</i>	Litologia <i>Lithology</i>
0,0–208,0	208,0	kenozoik <i>Cenozoic</i>	piaski, gliny, węgle brunatne <i>sands, clays, brown coals</i>
208,0–646,0	438,0	trias górny, ret <i>Upper Triassic, Rhaetian</i>	iłowce, ily <i>shales, clays</i>
646,0–972,0	326,0	trias górny, karnik <i>Upper Triassic, Carnian</i>	iłowce, anhydryty, mułowce <i>shales, anhydrites, mudstones</i>
972,0–1045,0	73,0	trias dolny (TK1) <i>Lower Triassic (TK1)</i>	mułowce, iłowce <i>mudstones, shales</i>
1045,0–1298,0	253,0	trias dolny + wapień muszlowy (T2) <i>Lower Triassic + Muschelkalk (T2)</i>	margle, iłowce, wapienie, dolomity <i>marls, shales, limestones, dolomites</i>
1298,0–1417,0	119,0	trias dolny <i>Lower Triassic</i>	margle, wapienie, dolomity, anhydryty <i>marls, limestones, dolomites, anhydrites</i>
1417,0–1882,0	465,0	trias dolny <i>Lower Triassic</i>	piaskowce, mułowce, margle, wapienie, iłowce <i>sandstones, mudstones, marls, limestones, shales</i>
1882,0–1897,0	15,0	perm, cechsztyń, iłowce przejściowe (IP) <i>Permian, Zechstein, transitional shales (IP)</i>	iłowce, anhydryt <i>shales, anhydrites</i>
1897,0–1912,0	15,0	perm, cechsztyń, aller (PZ4) <i>Permian, Zechstein, Aller (PZ4)</i>	sole, iłowce, anhydryty <i>salts, shales, anhydrites</i>
1912,0–2037,0	125,0	perm, cechsztyń, leine (PZ3) <i>Permian, Zechstein, Leine (PZ3)</i>	sole, iłowce, anhydryty <i>salts, shales, anhydrites</i>
2037,0–2133,5	96,5	perm, cechsztyń, strassfurt (PZ2) <i>Permian, Zechstein, Stassfurt (PZ2)</i>	anhydryty, sole, wapienie, dolomity <i>anhydrites, salts, limestones, dolomites</i>
2133,5–2265,0	131,5	perm, cechsztyń, werra (PZ1) <i>Permian, Zechstein, Werra (PZ1)</i>	anhydryty, dolomity, wapienie <i>anhydrites, dolomites, limestones</i>
2265,0–2309,0	44,0	karbon <i>Carboniferous</i>	mułowce, piaskowce <i>mudstones, sandstones</i>

mieniotwórczy uranu (^{238}U) i toru (^{232}Th), w mniejszym stopniu aktynouranu (^{235}U) oraz izotop promieniotwórczy potasu (^{40}K) mają decydujący wpływ na wielkość ciepła radiogenicznego.

Podstawowym geologicznym źródłem potasu, uranu i toru są kwaśne skały magmowe. Pierwiastki te występują w minerałach skałotwórczych, takich jak miki i skalenie, oraz w minerałach akcesorycznych, np. cyrkon, monacyt i inne. W procesach wietrzeniowych i sedymentacyjnych minerały te przechodzą niezmiennie do skał osadowych bądź ulegają rozkładowi, tworząc nowe minerały, głównie ilaste, z którymi mogą wiązać się pierwiastki promieniotwórcze (Jarzyna i in., 1999). Procesy te regulowane są parametrami fizyko-chemicznymi środowiska sedymentacyjnego – stężeniem jonów wodorowych (pH) i potencjałem redukcyjno-utleniającym (Eh).

Zawartości toru i potasu mogą być wykorzystane do oceny zailenia skał, natomiast składowa uranowa, rejestrowana w trakcie profilowania spektrometrycznego gamma (SPG), jest cennym wskaźnikiem obecności substancji organicznej. Skały macierzyste, w których generowały się węglowodory, mogą charakteryzować się wyższymi koncentracjami uranu (Jarzyna i in., 1999).

Wielkość ciepła radiogenicznego A jest determinowana, obok innych parametrów, przez własności termiczne skał.

Pomiary spektrometryczne gamma (SPG) wykonywane z innymi pomiarami geofizyki otworowej pozwalają

na określenie ilości ciepła radiogenicznego generowanego w skałach.

Poniżej podano wzór, który w niniejszej pracy zastosowano do określenia wielkości ciepła radiogenicznego A w czterech otworach rafy Brońsko: B-2, B-3, B-4 i B-8 (Rybach, 1986; Bückner & Rybach, 1996):

$$A = 0,01 \times \rho_b (9,52C_U + 2,56C_{Th} + 3,48C_K) \quad (1)$$

gdzie: A – ciepło radiogeniczne ($\mu\text{W}/\text{m}^3$), ρ_b – gęstość objętościowa (g/cm^3), C_U – zawartość uranu w skale (ppm), C_{Th} – zawartość toru w skale (ppm), C_K – zawartość potasu ^{40}K w skale (%).

W pracy Bückera i Rybacha (1996) przedstawiono również empiryczną relację pozwalającą na określenie parametru A na podstawie całkowitej wartości profilowania gamma w następującej postaci:

$$A = a(GR \pm b) \quad (2)$$

gdzie: a i b – stałe wartości, charakterystyczne dla danego rejonu badań, GR – całkowite promieniowanie gamma wyznaczone na próbkach lub zarejestrowane w otworze.

OKREŚLENIE CIEPŁA RADIOGENICZNEGO NA PODSTAWIE DANYCH GEOFIZYKI OTWOROWEJ I ANALIZA WYNIKÓW

W pierwszym etapie badań w celu scharakteryzowania osadów cechsztyńskich i rozpoznania obecności minerałów

skałotwórczych wykonano szereg wykresów krzyżowych (*crossplots*) opartych na pomiarach geofizyki otworowej. Do analizy wykorzystano standardowe pomiary geofizyki otworowej, obejmujące zestaw metod radiometrycznych, akustycznych i elektrycznych.

Dla potwierdzenia zasadności wzoru (2) zestawiono wykres (ryc. 2) charakteryzujący zależność całkowitego natężenia promieniowania gamma (rejestrowana krzywa GR w jednostkach standardowych API) w funkcji ciepła radiogenicznego, obliczonego na podstawie wzoru (1) ze spektrometrycznego profilowania gamma. Wykres sporządzono dla utworów cechsztynu i karbonu z otworu B-3. Kolorami zaznaczono gęstość objętościową zarejestrowaną podczas profilowania gamma-gamma.

Przedstawiona na wykresie prosta regresji opisuje związek między mierzoną wartością natężenia promieniowania gamma i ciepłem radiogenicznym, wyznaczonym z pomiarów spektrometrycznych. Otrzymany wysoki współczynnik korelacji liniowej ($r = 0,839$) wskazuje na istotną zależność obu zmiennych. Relację tę można wykorzystać do przybliżonej oceny ciepła radiogenicznego w sąsiednich otworach badanych osadów w przypadku braku pomiarów spektrometrycznych gamma.

Właściwe wykresy krzyżowe zamieszczono na rycinach 3 i 4. Na rycinie 3 znajduje się wykres oparty na pomiarach spektrometrycznych gamma-gamma rejestrowanych w utworach cechsztynu i karbonu w otworze B-4. Na osi pionowej naniesiono gęstość objętościową RHOB (g/cm^3), a na poziomej indeks absorpcji fotoelektrycznej Pe (barn/e).

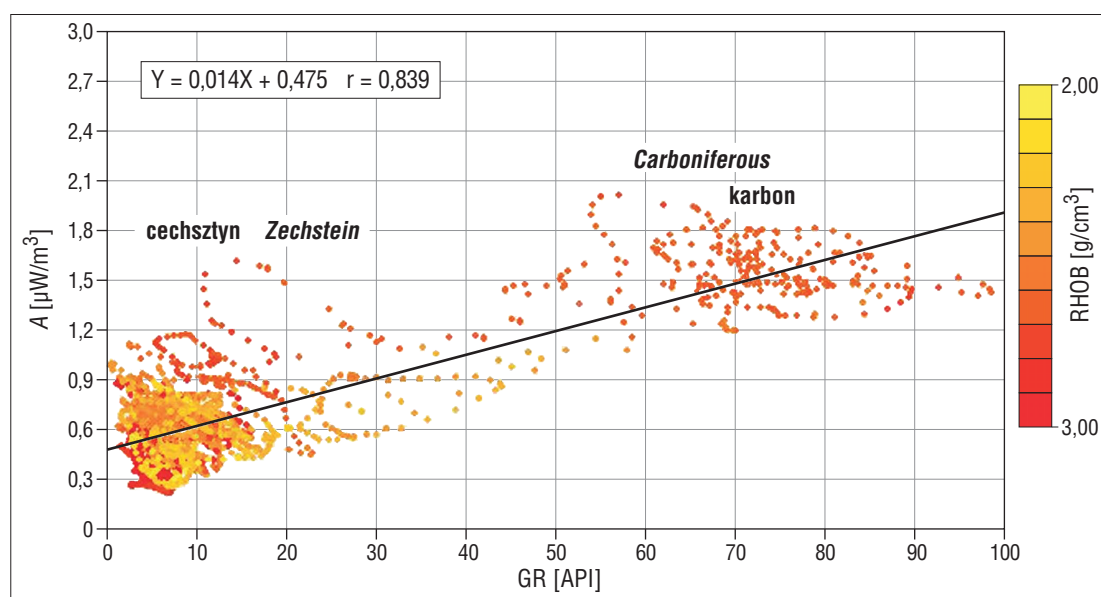
Wartość indeksu Pe charakteryzuje zdolność atomu danego pierwiastka do pochłonięcia kwantu gamma o energiach mniejszych od ok. 0,1 MeV. Indeks Pe jest zależny od liczb atomowych pierwiastków występujących w ośrodku, tym samym pozwala na identyfikację różnych minerałów budujących szkielet skalny. Na wspomnianym wykresie (ryc. 3) kolor oznacza zmianę ciepła radiogenicznego obliczonego na podstawie wzoru (1). Poniżej wykresu znajduje się profilowanie gamma z odjętą składową uranową, ozna-

czoną symbolem GRS, na której interwał o podwyższonych wartościach wskazań odzwierciedla utwory karbonu.

Analizując wykres, można zauważyć duże rozproszenie punktów, odpowiadające utworom dolomitowego (punkty czerwonioliliowe) i wapienia podstawowego (punkty niebieskoliliowe), świadczące o znacznym zróżnicowaniu składu mineralnego warstw. Osady karbonu, charakteryzują się podwyższeniem ciepła radiogenicznego, co związane jest ze wzrostem zawartości minerałów ilastych. Odpowiadające im punkty układają się w dolnej części wykresu, a ich wartości Pe zawierają się w przedziale 3,0–4,7 barn/e (punkty czerwone). Sole, o niskiej gęstości objętościowej i niskich wartościach ciepła radiogenicznego, występują w górnej części wykresu. Natomiast anhydryty, posiadające najwyższe wartości gęstości objętościowej i indeks Pe zawarty w przedziale 4,3–6,0 barn/e , plasują się w dolnej części wykresu krzyżowego. Ich rozproszenie w poziomie świadczy o przynależności do innych cyklotemów (anhydryt główny, anhydryt podstawowy, anhydryt kryjący). Porównując rozkład punktów na wykresie (ryc. 3) z wartościami średnimi Pe i gęstościami objętościowej dla poszczególnych minerałów podanymi w tabeli 2, widzimy uzasadnienie takiego układu punktów w utworach skalnych, zawierających najczęściej kompozycję różnych domieszek mineralnych (Schlumberger, 2000).

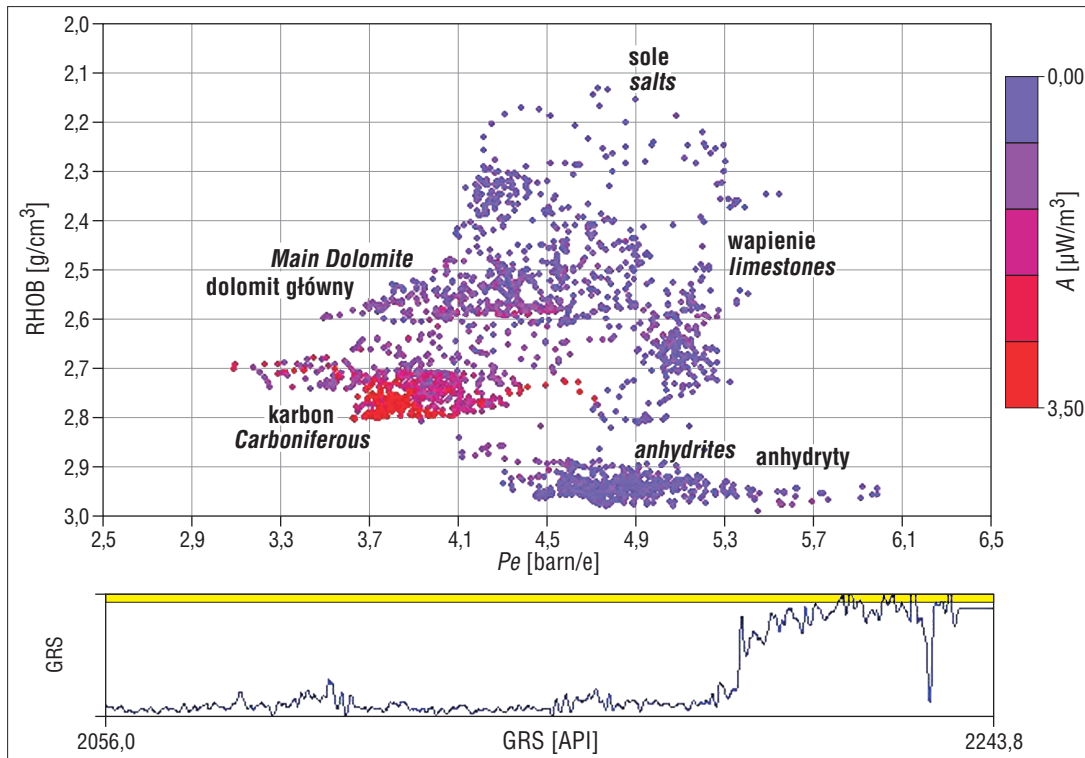
Zestawienie składowej uranowej rejestrowanej podczas spektrometrycznego profilowania gamma z indeksem absorpcji Pe dla utworów cechsztynu i karbonu (otwór B-8) pokazuje znaczne zróżnicowanie zawartości uranu – od bardzo niskich do 8,5 ppm. Podwyższenie jego ilości może wskazywać na obecność utworów będących źródłem węglowodorów, powodujących wzrost ciepła radiogenicznego (ryc. 4).

Na rycinie 4 kolorem niebieskim zaznaczono sole i anhydryty, charakteryzujące się niską wartością ciepła A ; kolor czerwony odpowiada utworom karbońskim (łupki, mułowce), a liliowym i ciemnoliliowym oznaczono wapień podstawowy i dolomit główny.



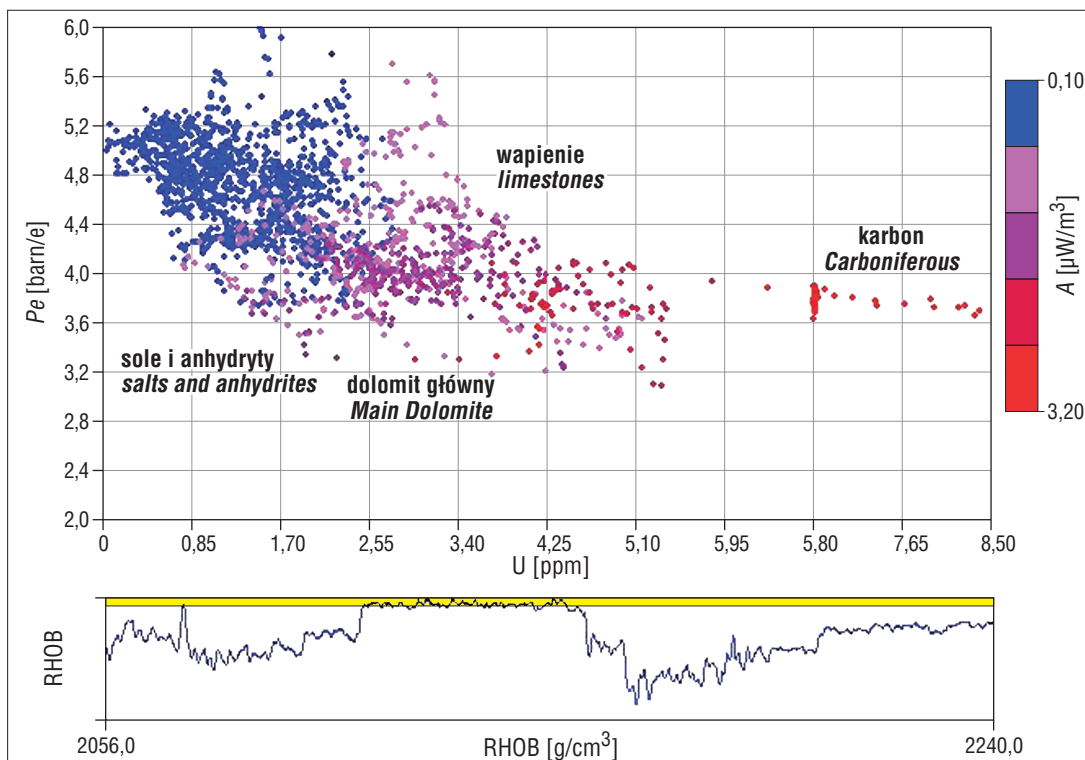
Ryc. 2. Wykres ciepła radiogenicznego A w funkcji całkowitego promieniowania gamma GR dla utworów cechsztynu i karbonu w otworze B-3

Fig. 2. Plot of radiogenic heat A as a function of total gamma ray GR for Zechstein and Carboniferous deposits in B-3 well



Ryc. 3. Wykres krzyżowy indeksu absorpcji fotoelektrycznej (Pe), gęstości objętościowej ($RHOB$) i ciepła radiogenicznego (A) opracowany dla utworów cechsztynu i karbonu w otworze B-4

Fig. 3. Crossplot of photoelectric absorption index (Pe), density ($RHOB$) and radiogenic heat (A) for Zechstein and Carboniferous deposits in borehole B-4



Ryc. 4. Wykres krzyżowy zawartości uranu (U) i indeksu absorpcji fotoelektrycznej (Pe) dla utworów cechsztynu i karbonu w otworze B-8

Fig. 4. Crossplot of uranium content (U) and photoelectric absorption index (Pe) for Zechstein and Carboniferous deposits in borehole B-8

Wykorzystując wspomniany wzór (1), obliczono wartość ciepła radiogenicznego dla utworów cechsztynu i karbonu w czterech otworach (B-2, B-3, B-4, B-8) znajdujących się w centralnej części rafy Brońsko. Szczególną uwagę

zwrócono na utwory wapienia podstawowego, będącego bardzo dobrą skałą zbiornikową o podwyższonej porowatości i znacznym nasyceniu gazem. Największe wartości ciepła A odpowiadają utworom karbońskim oraz dolomito-

wi głównemu i wapieniowi podstawowemu (tab. 3). Obecność iłow występujących w poziomach soli młodszych i iłach solonośnych podwyższa znacząco wartości ciepła A .

Dla przykładu na rycinie 5 przedstawiono wybrane profilowania geofizyki otworowej, zarejestrowane w interwale głębokościowym od 2160 m do 2245 m w otworze

Tab. 2. Wartości gęstości objętościowej $RHOB$ i indeksu absorpcji fotoelektrycznej Pe dla minerałów skalotwórczych i ewaporatów wg Schlumbergera (2000)

Table 2. Values for density $RHOB$ and photoelectric index Pe for rock minerals and evaporites after Schlumberger (2000)

Mineral <i>Mineral</i>	$RHOB$ [g/cm ³]	Pe [barn/e]
kwarc <i>quartz</i>	2,65	1,81
kalcyt <i>calcite</i>	2,71	5,08
dolomit <i>dolomite</i>	2,87	3,14
anhydryt <i>anhydrite</i>	2,97	5,10
halit <i>halite</i>	2,05	4,70
illit <i>illite</i>	2,52	3,5
montmorylonit <i>montmorillonite</i>	2,12	2,0
chloryt <i>chlorite</i>	2,76	6,3

Tab. 3. Zestawienie wartości minimalnych, maksymalnych i średnich ciepła radiogenicznego A wyznaczonego dla utworów cechsztynu i karbonu w otworach B-2, B-3, B-4 i B-8 rąfy Brońsko

Table 3. Compilation of minimum, maximum and average values of radiogenic heat A calculated for Zechstein and Carboniferous deposits in boreholes B-2, B-3, B-4 and B-8 of the Brońsko Reef

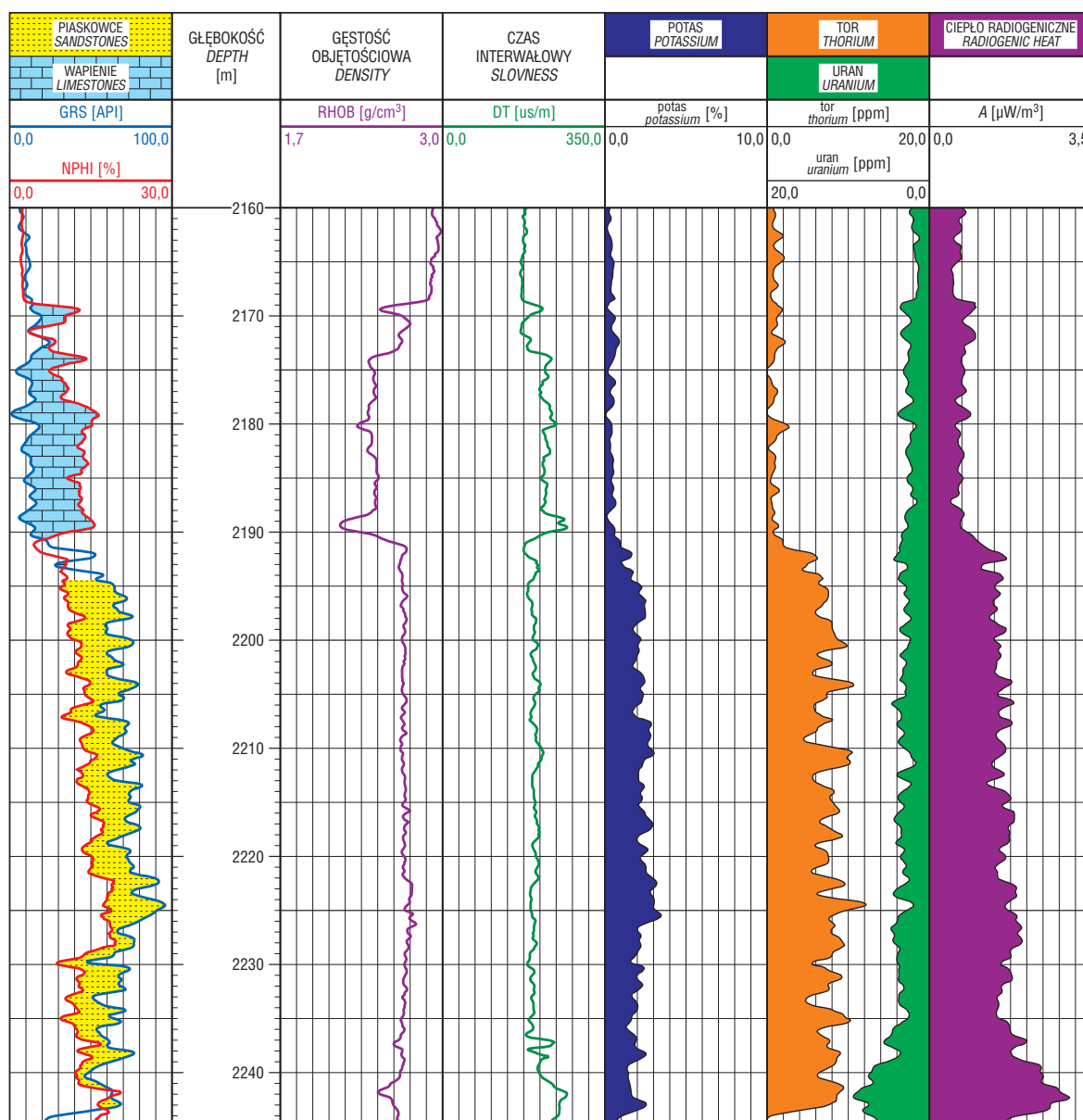
Otwór <i>Well</i>	Interwał [m] <i>Interval [m]</i>	Ciepło radiogeniczne A [$\mu\text{W}/\text{m}^3$] <i>Radiogenic heat A [$\mu\text{W}/\text{m}^3$]</i>			Stratygrafia i litologia <i>Stratigraphy and lithology</i>
		minimalne <i>minimal</i>	maksymalne <i>maximum</i>	średnia <i>average</i>	
B-2	1927,0–2010,0	0,229	1,130	0,393	sole (PZ2) <i>salts (PZ2)</i>
	2010,0–2048,5	0,280	0,686	0,426	anhydryt główny (A3) <i>Main Anhydrite (A3)</i>
	2048,5–2050,5	0,813	1,275	0,830	szary ił solny (IP3) <i>Grey Salt Clay (IP3)</i>
	2050,5–2053,0	0,322	0,728	0,739	anhydryt kryjący (A2r) <i>Screening Anhydrite (A2r)</i>
	2053,0–2081,5	0,249	0,548	0,346	starsza sól kamienna (Na2) <i>Older Halite (Na2)</i>
	2081,5–2101,5	0,281	0,941	0,411	anhydryt podstawowy (A2) <i>Basal Anhydrite (A2)</i>
	2101,5–2134,0	0,446	1,457	0,729	dolomit główny (Ca2) <i>Main Dolomite (Ca2)</i>
	2134,0–2181,0	0,291	0,974	0,635	anhydryt górny (A1) <i>Upper Anhydrite (A1)</i>
	2181,0–2200,0	0,422	1,200	0,636	wapień podstawowy (Ca1) <i>Basal Limestone (Ca1)</i>
	2200,0–2254,0	0,626	3,460	1,503	karbon – łupki, mułowce, piaskowce <i>Carboniferous – shales, mudstones, sandstones</i>

B-4. Na ścieżce 1 zestawiono wartość natężenia rejestrowanego w profilowaniu spektrometrycznym gamma z odjętą składową uranową, oznaczoną jako krzywa GRS (w jednostkach standardowych API), oraz profilowanie porowatości neutronowej, oznaczone jako NPHI (%). Stosując tzw. normalizację profiliowań (*overlays*), która polega na odpowiednim przetworzeniu i nałożeniu na siebie krzywych pomiarowych, można zidentyfikować wapień cechsztyński i utwory karbonu. Na ścieżce 2 i 3 przedstawiono profilowania gęstości, oznaczone jako $RHOB$ (g/cm³), i profilowanie akustyczne – DT ($\mu\text{s}/\text{m}$). Na obu tych krzywych wapień podstawowy zaznacza się dość wyraźnie obniżeniem gęstości objętościowej i podwyższeniem czasów interwałowych. Dwie następne ścieżki (4 i 5) przedstawiają, w odpowiednio dobranych skalach, składowe potasu C_K (%), toru C_{Th} (ppm) i uranu C_U (ppm), a ostatnia – obliczone ciepło radiogeniczne A ($\mu\text{W}/\text{m}^3$), znacznie wzrastające w utworach karbońskich.

W celu zobrazowania znacznego zróżnicowania badanych osadów w interwale występowania utworów cechsztynu i karbonu obliczono dla otworów B-2, B-3, B-4 i B-8 histogramy, które zamieszczono na rycinie 6.

Zbiorcze zestawienie obliczonego ciepła radiogenicznego A dla opracowywanych otworów zamieszczono w tabeli 3. Znajdują się w niej wartości minimalne, maksymalne i średnie ciepła A obliczone dla poszczególnych poziomów litostratygraficznych. Analizując uzyskane wyniki, można zauważyć, że średnie wartości ciepła radiogenicznego A mieszczą się między $0,255 \mu\text{W}/\text{m}^3$ dla utworów soli a $1,79 \mu\text{W}/\text{m}^3$ dla łupków i mułowców karbonu. Duże zmiany pomiędzy wartościami minimalnymi i maksymalnymi wskazują na niejednorodności występujące w danej

B-3	1920,0–2023,0	0,195	1,422	0,495	sole, iły (PZ2) <i>salts, clays (PZ2)</i>
	2023,0–2035,5	0,297	0,817	0,587	anhydryt główny (A3) <i>Main Anhydrite (A3)</i>
	2035,5–2037,0	0,730	1,352	0,919	szary il solny (IP3) <i>Grey Salt Clay (IP3)</i>
	2037,0–2039,5	0,332	0,636	0,494	anhydryt kryjący (A2r) <i>Screening Anhydrite (A2r)</i>
	2039,5–2074,0	0,174	0,471	0,457	starsza sól kamienna (Na2) <i>Older Halite (Na2)</i>
	2074,0–2089,0	0,221	0,513	0,481	anhydryt podstawowy (A2) <i>Basal Anhydrite (A2)</i>
	2089,0–2133,5	0,359	1,607	0,817	dolomit główny (Ca2) <i>Main Dolomite (Ca2)</i>
	2133,5–2174,0	0,277	1,098	0,614	anhydryt górny (A1) <i>Upper Anhydrite (A1)</i>
	2174,0–2265,0	0,239	1,111	0,713	wapień podstawowy (Ca1) <i>Basal Limestone (Ca1)</i>
	2265,0–2309,0	1,073	2,513	1,441	karbon – łupki, mułowce, piaskowce <i>Carboniferous – shales, mudstones, sandstones</i>
B-4	1922,0–2008,5	0,236	0,722	0,370	młodsza sól kamienna (Na3) <i>Younger Halite (Na3)</i>
	2008,5–2035,0	0,261	1,160	0,365	anhydryt główny (A3) <i>Main Anhydrite (A3)</i>
	2035,0–2036,0	0,494	1,134	0,605	szary il solny (IP3) <i>Grey Salt Clay (IP3)</i>
	2036,0–2038,5	0,377	0,469	0,366	anhydryt kryjący (A2r) <i>Screening anhydrite (A2r)</i>
	2038,5–2075,0	0,228	0,485	0,305	starsza sól kamienna i starsza sól potasowa (Na2/K2) <i>Older Halite and Older Potash (Na2/K2)</i>
	2075,0–2091,0	0,231	0,598	0,330	anhydryt podstawowy (A2) <i>Basal Anhydrite (A2)</i>
	2091,0–2130,5	0,480	1,460	0,766	dolomit główny (Ca2) <i>Main Dolomite (Ca2)</i>
	2130,5–2168,5	0,311	1,550	0,490	anhydryt górny (A1) <i>Upper Anhydrite (A1)</i>
	2168,5–2194,5	0,449	1,677	0,730	wapień podstawowy (Ca1) <i>Basal Limestone (Ca1)</i>
	2194,5–2270	1,221	3,022	1,307	karbon – łupki, mułowce, piaskowce <i>Carboniferous – shales, mudstones, sandstones</i>
B-8	2056,0–2073,0	0,127	0,684	0,255	sól (Na2) <i>salt (Na2)</i>
	2073,0–2108,0	0,330	1,418	0,700	dolomit główny (Ca2) <i>Main Dolomite (Ca2)</i>
	2108,0–2154,0	0,136	0,761	0,367	anhydryt górny (A1) <i>Upper Anhydrite (A1)</i>
	2154,0–2178,0	0,285	1,090	0,742	wapień podstawowy (Ca1) – część górna <i>Basal Limestone (Ca1) – upper part</i>
	2178,0–2190,0	0,259	0,782	0,443	wapień podstawowy (Ca1) – część dolna <i>Basal Limestone (Ca1) – lower part</i>
	2190,0–2330,0	0,653	3,189	1,790	karbon – łupki, mułowce, piaskowce <i>Carboniferous – shales, mudstones, sandstones</i>



Ryc. 5. Zestawione profilowania: gamma z odjętą składową uranową (GRS), porowatości neutronowej (NPHI), gęstości objętościowej (RHOB) i akustyczne (DT), składowe potasu (C_K), toru (C_{Th}) i uranu (C_U) oraz obliczone ciepło radiogeniczne (A) w interwale głębokościowym od 2160 m do 2245 m w otworze B-4

Fig. 5. Combination of gamma-ray log without uranium component (GRS), neutron porosity log (NPHI), density log (RHOB), acoustic log (DT), components of potassium (C_K), thorium (C_{Th}) and uranium (C_U) and calculated radiogenic heat (A) at a depth interval between 2160 m and 2245 m in borehole B-4

serii litostratygraficznej, co potwierdzają również histogramy (ryc. 6). Podobne zakresy zmian ciepła radiogenicznego uzyskano w sąsiednich otworach B-9, B-10 i B-11 rafy Brońsko (Krawiec, 2007b).

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Pomiary spektrometryczne gamma i gamma-gamma pozwalają na określenie wartości ciepła radiogenicznego A generowanego w skałach na skutek rozpadu pierwiastków promieniotwórczych.

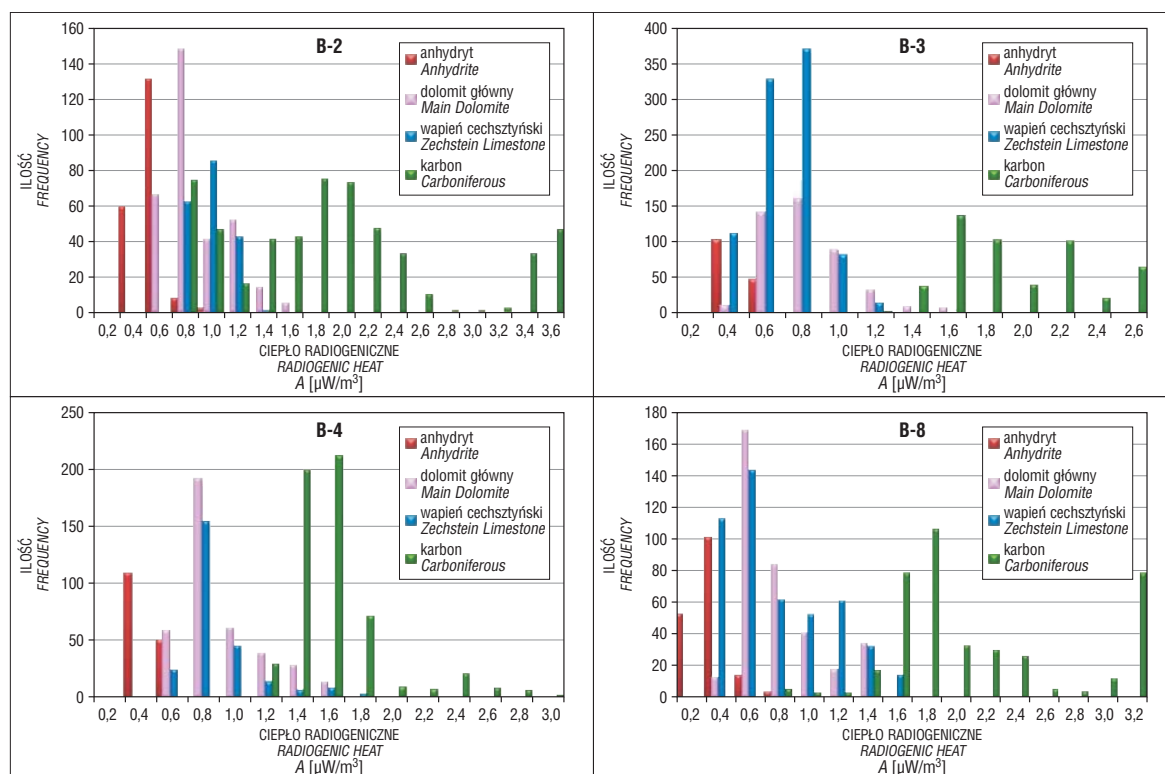
Dla osadów rafy Brońsko w interwale cechsztynu i karbonu wartości średnie ciepła radiogenicznego A wynoszą od 0,255 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ w utworach solonośnych do 1,79 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ dla łupków i mułowców karbonu.

Obecność ilów, występujących w poziomach soli młodszych i ilach solonośnych, podnosi znacząco wartości

ciepła A , na skutek podwyższonej zawartości składowej toru i potasu.

Duże zróżnicowanie utworów wapienia cechsztynskiego i utworów karbonu pociąga za sobą dużą zmienność ciepła radiogenicznego.

Wzrost zawartości uranu w utworach dolomitu i wapienia może świadczyć o podwyższonej w tych osadach ilości materii organicznej. Skałami macierzystymi dla węglowodorów nasycających rafowe utwory wapienia podstawowego mogą być podścielające skały ilaste karbonu, w których obserwuje się znaczny wzrost ciepła radiogenicznego. Stwierdzenie to, wynikające z obliczonych wartości parametru A , podziela wielu geologów naftowych, czego wyrazem jest oficjalna wypowiedź dyrektora geologii PGNiG SA Oddział w Zielonej Górze A. Mularczyka na łamach czasopisma tego oddziału: „skały karbońskie są skałami macierzystą – to one wygenerowały w głównej mierze



Ryc. 6. Histogramy ciepła radiogenicznego A w utworach cechsztynu i karbonu w otworach: B-2, B-3, B-4 i B-8

Fig. 6. Histograms of radiogenic heat A for Zechstein and Carboniferous deposits in boreholes B-2, B-3, B-4 and B-8

węglowodory, które w procesie migracji przedostały się do wyżej położonych skał czerwonego spągowca i wapienia cechsztyńskiego i tam zostały uwiecznione” (Mundry, 2010). Podobny pogląd przedstawiony jest również w pracy Karnowskiego (1993): „na monoklinie przedsudeckiej niezbyt silnie zdiagenezowane utwory karbonu o dużym zaangażowaniu tektonicznym stanowiły skałę macierzystą dla gazu ziemnego, występującego w jego nadkładzie”.

Autorki dziękują przedsiębiorstwu Geofizyka Toruń Sp. z o.o. i PGNiG SA Warszawa za udostępnienie pomiarów geofizyki otworowej. Praca została wykonana w ramach projektu badawczego N N525 363537 realizowanego w latach 2009–2012 pod kierunkiem Marii Bały, finansowanego przez MNiSW.

LITERATURA

- BOTOR D. & KOSAKOWSKI P. 2000 – Zastosowanie modeli numerycznych do rekonstrukcji paleotemperatur i procesów generowania węglowodorów. *Prz. Geol.*, 48: 154–161.
- BÜCKER CH. & RYBACH L. 1996 – A simple method to determine heat production from gamma-ray logs. *Mar. Pet. Geol.*, 13: 373–375.
- CERMAK V., BODRI L., RYBACH L. & BUNTEBARTH G. 1990 – Relationship between seismic velocity and heat production: comparison of two sets of data and test of validity. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 99: 48–57.
- CIECHANOWSKA M. & GAŚSIOR I. 2000 – Ciepło radiogeniczne emitowane przez utwory mioceńskie przedgórz Karpat. *Nafta-Gaz*, 56: 197–208.
- FÖRSTER A. & FÖRSTER H.J. 2000 – Crustal composition and mantle heat flow: implications from surface heat flow and radiogenic heat production in the Variscan Erzgebirge (Germany). *J. Geophys. Res.*, 105: 27 917–27 938.
- JARZYNA J., BAŁA M. & ZORSKI T. 1999 – Metody geofizyki otworowej, pomiar i interpretacja. Wyd. AGH, Kraków.
- KARNOWSKI P. 1993 – Złoże gazu ziemnego i ropy naftowej w Polsce, t. 1. *Tow. Geosynopt. GEOS AGH, Kraków*.
- KEEN C.E. & LEVIS T. 1982 – Measured radiogenic heat production in sediments from continental margin of eastern North America: implications for petroleum generations. *AAPG Bull.*, 66: 1402–1407.
- KOTARBA M.J., PERYT T.M., KOSAKOWSKI P. & WIĘCŁAW D. 2006 – Organic geochemistry, depositional history and hydrocarbon generation modeling of the Upper Permian-Kupferschiefer and Zechstein Limestone strata in south-west Poland. *Mar. Pet. Geol.*, 23: 371–386.
- KOTARBA M., PIELA J. & ŻOŁNIERCZUK T. 1992 – Geneza gazu ziemnego akumulowanego w permsko-karbońskich pułapkach litologicznych złoże Paproć w świetle badań izotopowych. *Prz. Geol.*, 40: 260–263.
- KOTARBA M.J. & WAGNER R. 2007 – Generation potential of the Zechstein Main Dolomite (Ca₂) carbonates in the Gorzów Wielkopolski-Międzychód-Lubiatów area: geological and geochemical approach to microbial-algal source rock. *Prz. Geol.*, 55: 1025–1036.
- KOTARBA M.J., WIĘCŁAW D. & KOWALSKI A. 2000 – Skład, geneza i środowisko generowania ropy naftowej w utworach dolomitu głównego zachodniej części obszaru przedsudeckiego. *Prz. Geol.*, 48: 436–442.
- KRAWIEC J. 2007a – Ciepło radiogeniczne generowane przez mioceńskie utwory piaszczowcowo-ilaste w rejonie złoże Husów. *Nafta-Gaz*, 63: 175–178.
- KRAWIEC J. 2007b – Correlation radiogenic heat production with presence of organic matter – qualitative analysis. *Proc. Near Surface 2007. 13th European meeting of environmental and engineering geophysics, 3–5 September 2007, Istanbul, Turkey. Extended abstracts & exhibitors catalogue.*
- KUCZAK W. 2002 – Dokumentacja geologiczna złoże gazu ziemnego Brońsko. *ZZGNIg, Zielona Góra*.
- LEVORSEN A.I. 1972 – Geologia ropy naftowej i gazu ziemnego. *Wyd. Geol., Warszawa*.
- MCKENNA T.E. & SHARP J.M. 1998 – Radiogenic heat production in sedimentary rocks of the Gulf of Mexico basin, South Texas. *AAPG Bull.*, 82: 484–496.
- MUNDRY D. 2010 – Ile gazu w łupkach? *Szejk*, 98: 6.
- NORDEN B. & FÖRSTER A. 2006 – Thermal conductivity and radiogenic heat production of sedimentary and magmatic rocks in the Northeast German Basin. *AAPG Bull.*, 90: 939–962.
- PLEWA M. 1988 – Wyniki badań ciepła radiogenicznego skał obszaru Polski. *Zesz. Nauk. AGH, Geof. Stosowana*, 1: 125–137.
- PLEWA S. 1994 – Rozkład parametrów geotermalnych na obszarze Polski. *Wyd. CPPGSMiE PAN, Kraków*.
- RYBACH L. 1986 – Amount and significance of radioactive heat sources in sediments. [In:] Burrus J. (ed.) *Thermal Modeling of Sedimentary Basins, Collection Colloques et Seminaires 44. Technip, Paris*: 311–322.
- SCHLUMBERGER 2000 – Log Interpretation Charts. 2000 Edition. *Sugar Land, Texas*.
- WAPLES D.W. 2002 – A new model for heat flow in extensional basins: estimating radiogenic heat production. *Nat. Resour. Res.*, 11: 125–133.

Praca wpłynęła do redakcji 28.03.2011 r.
Po recenzji akceptowano do druku 31.05.2011 r.