

INTEGRACJA MIKROTERMOMETRII INKLUZJI FLUIDALNYCH I MODELOWAŃ HISTORII TERMICZNEJ/POGRAŻANIA W BADANIACH POCHODZENIA WĘGLOWODORÓW I ICH NAGROMADZEŃ W SKAŁACH DOLOMITU GŁÓWNEGO (Ca₂) PÓŁNOCNO-ZACHODNIEJ POLSKI (OTWÓR WIERTNICZY BENICE-3)

FLUID INCLUSION MICROTHERMOMETRY AND BURIAL/THERMAL HISTORY MODELING COMBINED TO REVEAL HYDROCARBON ORIGIN AND ACCUMULATION IN THE MAIN DOLOMITE (Ca₂) ROCKS OF NORTHWESTERN POLAND (WELL BENICE-3)

MIROSLAW SŁOWAKIEWICZ¹, PAWEŁ POPRAWA¹

Abstrakt. Badania inkluzji fluidalnych są bardzo pomocne w zrozumieniu procesów cementacji w skałach zbiornikowych oraz określenia relacji między nimi a migracją węglowodorów. W połączeniu z modelowaniem basenów badania te pozwalają uszczegółwić historię pograżania, temperatury i ciśnienia danego basenu sedymentacyjnego. Przykład integracji tych metod badawczych stanowią prezentowane w artykule wyniki badań przeprowadzonych na próbkach z otworu wiertniczego Benice-3. Próbkę pobrano z utworów węglanowych dolomitu głównego (Ca₂), występujących w obrębie platformy węglanowej Kamienia Pomorskiego (PWKP, Pomorze Zachodnie). Obszar ten stanowi północno-zachodnią część polskiego basenu cechsztyńskiego. Na obszarze PWKP znajduje się jedno z największych polskich złóż ropy naftowej Kamień Pomorski, występujące w węglanowych facjach platformowych Ca₂. Skały zbiornikowe reprezentują facje doloziarnitów zdeponowanych w strefie płycizn oolitowych. Inkluzje fluidalne znaleziono we wczesnodiagenetycznych cementach anhydrytowych. Po uzyskaniu danych mikrotermometrycznych obliczono rzeczywiste wartości temperatury i ciśnienia precypitacji cementów anhydrytowych, które wynoszą: 94–110°C oraz 270–330 bary. Stężenie solanki wynosi od 1,6 do 5,2% wag. równoważnika NaCl z małą ilością CO₂ oraz CaCl₂. Skład jest typowy dla roztworów formacyjnych związanych z procesami anhydrytyzacji skał dolomitu głównego w warunkach płytkiego do średniego pogrzebania. Porównując wyniki otrzymane z pomiarów inkluzji fluidalnych z modelowaniami historii pogrzebania basenu sedymentacyjnego stwierdzono, że temperatury 94–110°C zostały osiągnięte przez cementy anhydrytowe w okresie wczesnej–późnej jury, tj. ok. 153–181 mln lat temu. Migracja roztworów niosących węglowodory miała miejsce przed migracją fluidów, które doprowadziły do anhydrytyzacji, ale po procesach dolomityzacji.

Słowa kluczowe: inkluzje fluidalne, modelowanie historii pogrzebania/termicznej, dolomit główny, cechsztyń, platforma Kamienia Pomorskiego.

Abstract. Fluid inclusion studies can be very helpful in understanding petroleum genesis and hence aid hydrocarbon exploration. When combined with basin modeling, such studies may allow detailed refinements to the general burial–temperature–pressure history of a sedimentary basin. As a case study, borehole data derived from the Main Dolomite (Ca₂) carbonates of the Benice-3 well located within the Kamień Pomorski carbonate platform (KPCP, West Pomerania) of the northwestern part of the Polish Zechstein Basin were considered. The KPCP area contains one of the largest Polish oilfields, Kamień Pomorski, localized within the Ca₂ platform facies and contains geological reserves of 317974 BBL of oil. The reservoir rocks of the Ca₂ are characterized primarily by oolitic dolograins facies deposited within the oolite shoal zone. In this study, fluid inclusion data were obtained from early diagenetic anhydrite cements. After pressure correction, these data revealed temperatures within the range 94–110°C with pressures of 270–330 bars. The composition of the brine was found to be from 1.6 to 5.2 wt. % NaCl with small amounts of CO₂ and CaCl₂. This represents formation brines associated with an anhydritization process of the Main Dolomite rocks during shallow-to-intermediate burial conditions. By integration of the results of fluid inclusion microthermometry with

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; e-mail: mslo@pgi.gov.pl, pawel.poprawa@pgi.gov.pl

a basin modeling approach claimed that temperatures of 94–110°C were obtained by anhydrite cements during Early–Late Jurassic time. Migration of hydrocarbon-bearing solutions was before migration of fluids which led to anhydritization but after dolomitization.

Key words: fluid inclusions, burial/thermal history modeling, Main Dolomite, Zechstein, Kamień Pomorski Platform.

WSTĘP

Badania inkluzji fluidalnych (analiza mikrotermometryczna) w skałach osadowych są jedną z najczęściej stosowanych metod petrologicznych. Wyniki analiz mikrotermometrycznych wraz z badaniami historii pogrzebania skał odsłaniają kluczowe etapy historii diagenetycznej skał i minerałów oraz kierunki paleofluidów i ich ciśnienia, temperaturę oraz skład solanki (np. Roedder, 1984; Goldstein, Reynolds, 1994). Badania te pełnią szczególną rolę w poszukiwaniu złóż węglowodorów oraz ich pułapek (np. Burruss, 1981).

W niniejszym artykule autorzy zwracają uwagę na integrację analizy mikrotermometrycznej z modelowaniami

historii pogrzebania i termicznej skał na przykładzie barierowych utworów węglanowych cechsztyńskiego dolomitu głównego (Ca2) z otworu wiertniczego Benice-3, położonego w zachodniej części Pomorza Zachodniego (fig. 1). Powiązanie tych dwóch rodzajów badań stanowi znakomite uzupełnienie prac związanych z poszukiwaniami węglowodorów w skałach zbiornikowych (np. Fischer *et al.*, 2006).

Opis mikrofacji, warunki sedymentacji i procesy diagenetyczne w skałach dolomitu głównego w otworze wiertniczym Benice-3 przedstawiono w pracy Słowakiewicza *et al.* (2008, 2010).

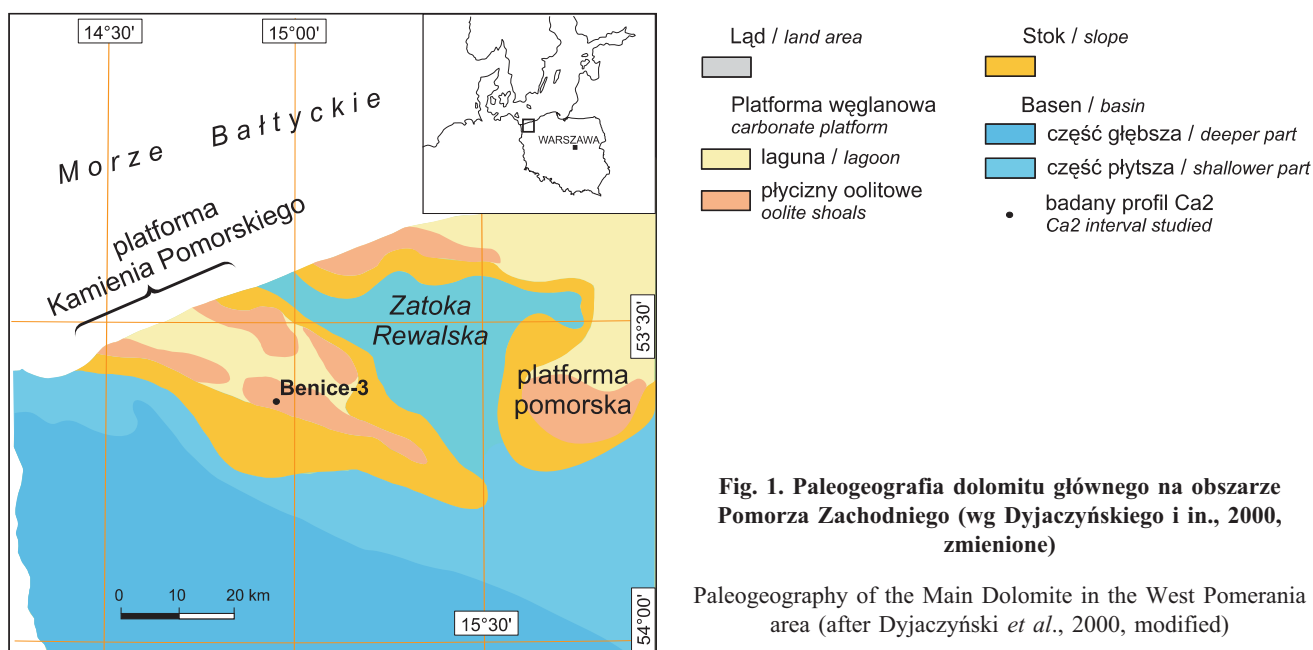


Fig. 1. Paleogeografia dolomitu głównego na obszarze Pomorza Zachodniego (wg Dyjaczynskiego *et al.*, 2000, zmienione)

Paleogeography of the Main Dolomite in the West Pomerania area (after Dyjaczynski *et al.*, 2000, modified)

METODYKA I MATERIAŁ BADAWCZY

Do badań inkluzji fluidalnych wybrano pięć próbek z otworu wiertniczego Benice-3. Zostały one wyselekcjonowane po wykonaniu szczegółowych obserwacji w płytkach cienkich pełnego profilu skał dolomitu głównego w badanym otworze wiertniczym. Przygotowano obustronnie poleowane płytki grube według metodyki zaproponowanej przez Słowakiewicza (2003) w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Po zakończeniu obserwacji w mikroskopie polaryzacyjnym płytki skalne usunięto ze szkiełek podsta-

wowych z wykorzystaniem acetonu w celu przeprowadzenia analiz zamrażania i ogrzewania. Ogrzewanie i zamrażanie inkluzji wykonano na stoliku zamrażająco-grzewczym LINKAM THMSG 600, przymocowanym do mikroskopu polaryzacyjnego NIKON ECLIPSE E600. Dla każdej inkluzji przeprowadzono pomiar dwu- lub trzykrotnie, otrzymując dokładność 0,1°C podczas zamrażania i 1°C podczas ogrzewania. Tempo zamrażania wynosiło 10°C/min, a kiedy zbliżano się do temperatury eutektycznej (T_e), topnienia hydro-

halitu ($T_{m_{HH}}$), lodu ($T_{m_{ICE}}$) i klatratu ($T_{m_{CLA}}$), obniżano je do $0,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$. W przypadku ogrzewania tempo wynosiło $50^{\circ}\text{C}/\text{min}$, a przy zbliżaniu się do temperatury homogenizacji (T_h) obniżano je do $0,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Wyniki pomiarów mikrotermometrycznych przedstawiono w tabeli 1.

Przeprowadzono również badania katodoluminescencyjne (CL), które nie ujawniły procesów rekrytalizacji mogących wpłynąć na zmianę składu płynu w inkluzjach lub ich kształtu i rozmiaru (Słowakiewicz i in., 2010).

Dla otworu wiertniczego Benice-3 wykonano jednowymiarowe numeryczne modelowania dojrzałości w celu rekonstrukcji historii termicznej i pograżania utworów dolomitu głównego. Obecny strumień ciepły obliczono na podstawie profilowania temperatury z otworów znajdujących się w pobliżu analizowanego otworu wiertniczego. Dla otworu

Benice-3 przyjęto wartość $44 \text{ mW}/\text{m}^2$. W związku z małą ilością danych dojrzałości termicznej w badanym profilu Ca2 (dwa pomiary refleksyjności wityrynytu VR_o z głębokości $2773,5 \text{ m} - 0,73\% R_o$ oraz $2798,5 \text{ m} - 0,72\% R_o$) zastosowano najprostsz model stałego strumienia ciepłego w czasie. Ponadto wartości przewodności termicznej oraz pojemności cieplnej dla każdego typu osadów przyjęto z uwzględnieniem wyników średnich pomiarów laboratoryjnych udostępnionych w materiałach publikowanych. Parametry te zmieniły się w czasie w modelu jako funkcja kompaktacji mechanicznej. Historia pogrzebienia została skorygowana o wielkość dekompancji według algorytmu Baldwina i Butlera (1985). Do modelu również włączono historię temperatury powierzchniowej. Dojrzałość termiczna była modelowana przy pomocy algorytmu Sweeneya i Burnhama (1990).

Tabela 1

Wyniki pomiarów mikrotermometrycznych inkluzji jedno- (1) i dwufazowych (2) zamkniętych w cementach anhydrytowych

Results of microthermometric studies of one- (1) and two-phase (2) inclusions entrapped in anhydrite cements

FIA	Te	$T_{m_{ICE}}$	$T_{m_{CLA}}$	$T_{m_{HH}}$	Th	Typ inkluzji	Rw. % wag. NaCl	Rw. % wag. CaCl ₂
FIA1	-48,4	-	9,2	-25	-	2	1,64	-
	-46,6	-	-	-26,5	-	2	-	-
	-47,2	-	-	-24	-	2	-	-
FIA2	-48,3	-	8,2	-28,2	-	1	3,58	-
	-46	-	8,7	-28	-	1	2,62	-
FIA3	-46,4	-	7,3	-25,4	-	2	5,23	-
	-52	-	8,3	-26,4	-	2	3,39	-
FIA4	-52	-	-	-26,2	-	2	-	-
	-51,6	-	7,8	-26,6	105,7	2	4,33	-
	-54	-	-	-26,1	105,5	2	-	-
FIA5	-47	-	-	-23,4	-	1	-	-
	-51	-	8	-27	-	1	3,96	-
	-52	-	7,9	-25,1	-	1	4,14	-
	-47,5	-	7,8	-26,2	-	2	4,33	-
FIA6	-46,6	-	-	-26	-	2	-	-
	-48	-	-	-26	-	2	-	-
	-51,5	-	-	-26,1	-	2	-	-
FIA7	-56	-	8,2	-26,5	98	2	3,58	-
	-55,3	-	-	-26,3	90	2	-	-
	-50,5	-	7,8	-25,9	94	2	4,33	-
	-52,5	-4,7	9	-25,7	95	2	1,57	2,42

FIA – zespół inkluzji fluidalnych, Te – temperatura eutektyczna, $T_{m_{ICE}}$ – temperatura topnienia lodu, $T_{m_{CLA}}$ – temperatura topnienia klatratu, $T_{m_{HH}}$ – temperatura topnienia hydrohalitu, Th – temperatura homogenizacji, Rw. % wag. NaCl i rw. % wag. CaCl₂ – równoważniki % wag. NaCl i CaCl₂

FIA – fluid inclusion assemblage, Te – eutectic temperature, $T_{m_{ICE}}$ – temperature of melting of ice, $T_{m_{CLA}}$ – temperature of melting of clathrate, $T_{m_{HH}}$ – temperature of melting of hydrohalite, Th – temperature of homogenization, wt.% NaCl eq. and wt.% CaCl₂ eq. – weight % equivalents of NaCl and CaCl₂

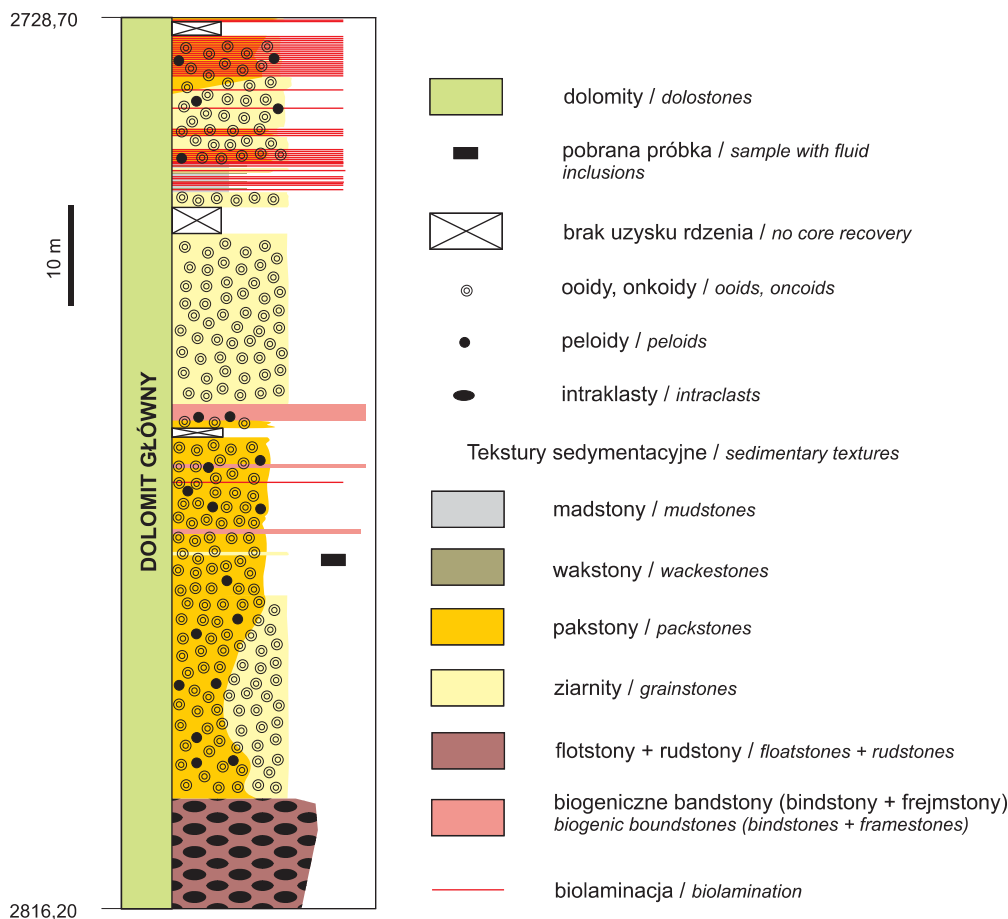


Fig. 2. Profil mikrofacji pływacz oolitowych skał węglanowych dolomitu głównego w otworze wiertniczym Benice-3 (Mikołajewski, 2007; Słowakiewicz i in., 2008)

Microfacies log of the oolite shoal carbonate rocks of the Main Dolomite in well Benice-3 (Mikołajewski, 2007; Słowakiewicz i in., 2008)

Miaższość brakującego nadkładu skał jurajsko-kredowych oszacowano na ok. 950 m, na podstawie rekonstrukcji paleomiaższości opublikowanych przez Marka i Pajchlową (1997).

Inkluzje fluidalne badano jako tzw. zespoły inkluzji fluidalnych (FIA) zgodnie z propozycją Jermakowa (1972) oraz Goldsteina i Reynoldsa (1994). Znalaziono siedem FIA w spoiwach anhydrytowych. Różnica zmierzonych wartości temperatury oraz stężenia solanek w FIA nie powinna być wyższa niż 10–15° lub 10–15% wag. sumy soli. W przypadku przekroczenia tych wartości będzie to oznaczało, że FIA zostały zmienione wskutek procesów rekryształacji poprzez tzw. osiągnięcie równowagi wtórnej przez inkluzje w warunkach termicznych (*thermal reequilibration*; np. Bodnar, 2003). W wyniku dokładnej analizy inkluzji fluidalnych znaleziono bardzo małe inkluzje (zwykle od 1 do kilku μm), jednofazowe (całkowicie ciekłe) i dwufazowe (mały pęcherzyk gazu i faza ciekła) ciekłogazowe (L–V), w których objętość cieczy w inkluzji wynosiła 85–90% w temperaturze pokojowej. Oznacza to, że inkluzje zostały zamknięte w warunkach środowiska homogenicznego (fig. 3). W związku z tym, inkluzje zawierają pierwotnie zamknięty płyn, występują wzdłuż stref wzrostu kryształu i mają kształty kry-

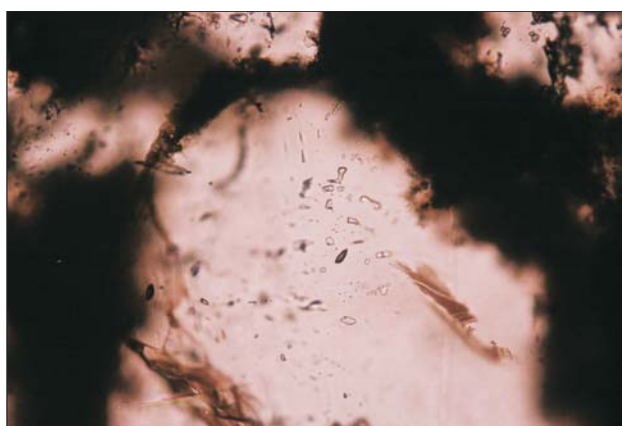


Fig. 3. Zespół pierwotnych inkluzji dwufazowych ułożonych wzdłuż stref wzrostu kryształu anhydrytu w skałach dolomitu głównego

Otwór wiert. Benice-3, głęb. 2783,5 m; wielkość inkluzji 1–10 μm

Primary two-phase fluid inclusion assemblage entrapped with growth zones of anhydrite crystal of the Main Dolomite rocks

Benice-3 well, depth 2783.5 m, size of inclusions 1–10 μm

sztalu-gospodarza. Aby uniknąć zjawiska rozciągania inkluzji (*stretching*; Larson i in., 1973) inkluzje dwufazowe najpierw ogrzewano, a następnie zamrażano. Inkluzje wtórne o kształtach przypominających kształty kryształu-gospodarza znaleziono w FIA2 i FIA5 (tab. 1). Zbadano 21 inkluzji. Inkluzje ciekłe i ciekło-gazowe znaleziono tylko na głębokości 2783,5 m w otworze wiertniczym Benice-3 (fig. 3). Nie

znaleziono inkluzji ropy naftowej ani minerałów potomnych (*daughter minerals*), takich jak halit, sylwin czy anhydryt.

Stężenia solanek w inkluzjach obliczono na podstawie T_{mICE} , T_{mCLA} i T_{mHH} stosując wzory i metodykę zaproponowaną przez: Janatiwą (1946), Oakesa i in. (1990), Darlinga (1991), Duana i in. (1992a, b), Bodnara (1993) oraz Bodnara, Vityka (1994).

WYNIKI

Zmierzono temperatury homogenizacji dla zespołów FIA4 oraz FIA7, które wynoszą odpowiednio: 90–98°C oraz około 105°C. Inkluzje ciekło-gazowe zamrzały w przedziale temperatur od –71 do –87°C, co wskazuje na obecność solanek zawierających NaCl, CaCl₂ lub MgCl₂. Stopniowo ogrzewając zamrożone inkluzje zmierzono: temperaturę eutektyczną (T_e) wynoszącą od –46 do –55,3°C, wskazującą na obecność NaCl oraz CaCl₂, temperaturę topnienia hydrohalitu (T_{mHH}) od –28,2 do –24°C oraz temperaturę topnienia klatratu (T_{mCLA}) od 7,8 do 9,2°C. Na ich podstawie obliczono stężenie solanek, które wynosi 2,62 do 4,14% wag. równoważnika NaCl. Obecność klatratów wskazuje na występowanie małych ilości ditlenku węgla.

Wartości mediany dla T_h i T_{mICE} dla FIA7 wynoszą odpowiednio 96,5°C i 3,95% wag. równoważnika NaCl (tab. 2). Wielkości te zostały wykorzystane do obliczenia gęstości solanki, która wynosi 98 g/cm³ (0,70 mol NaCl). Na podstawie uzyskanych danych oraz wyznaczonego gradientu geotermicznego (26°C/km) obliczono temperaturę oraz ciśnienie w jakich krystalizował cement anhydrytowy (fig. 4). Temperatura 96,5°C oraz ciśnienie 290 bary zostały osiągnięte na głębokości 2800 m we wczesnej jurze, ok. 180 mln lat temu (fig. 4). Obliczenie poprawki na ciśnienie pozwoliło określić minimalną temperaturę krystalizacji cementów anhydrytowych, która waha się od 94 do 110°C, a ciśnienie krystalizacji od 270 do 330 barów (fig. 5) przy stężeniu solanki od 1,6 do 5,2% wag. równoważnika NaCl. Obliczone wartości temperatury i ciśnienia zostały osiągnięte 153–181 mln lat temu w okresie wczesnej–późnej jury.

Roztwory o składzie chemicznym H₂O–CO₂–NaCl–CaCl₂, z których strąciły się cemeny anhydrytowe, są przykładem roztworów formacyjnych typowych dla środowisk diagenetycznych (Roedder, 1984). Ponadto roztwory te nie były źródłem roztworów dolomityzujących. Ditlenek węgla zidentyfikowany poprzez T_{mCLA} mógł pochodzić z rozkładu

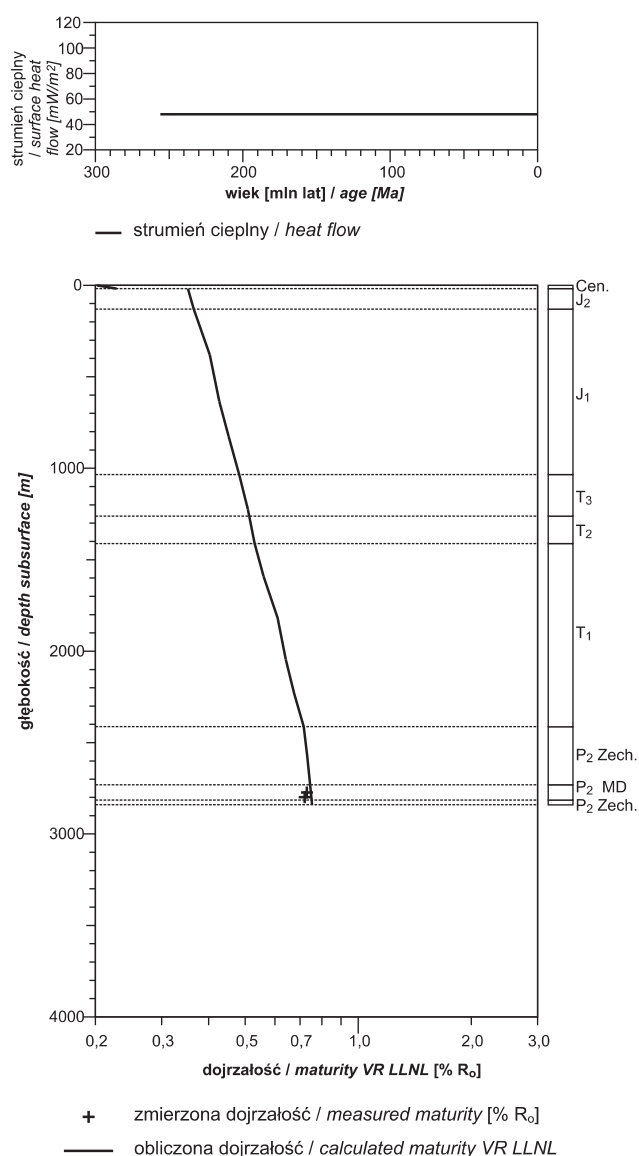


Fig. 4. Przyjęty scenariusz historii strumienia ciepłego oraz kalibracja modelu pomierzonymi wartościami VR_0

W modelu oszacowano miąższość brakującego nadkładu skał jurajsko-kredowych na 950 m na podstawie rekonstrukcji paleomiąższości opublikowanych przez Marka i Pajchłową (1997)

Assumed heat flow scenario, as well as calibration of the analyzed model with measured VR_0 data

In the current model thickness of missing Jurassic–Cretaceous section was estimated for 950 m, based on paleothickness reconstructions presented in the volume by Marek and Pajchłowa (1997)

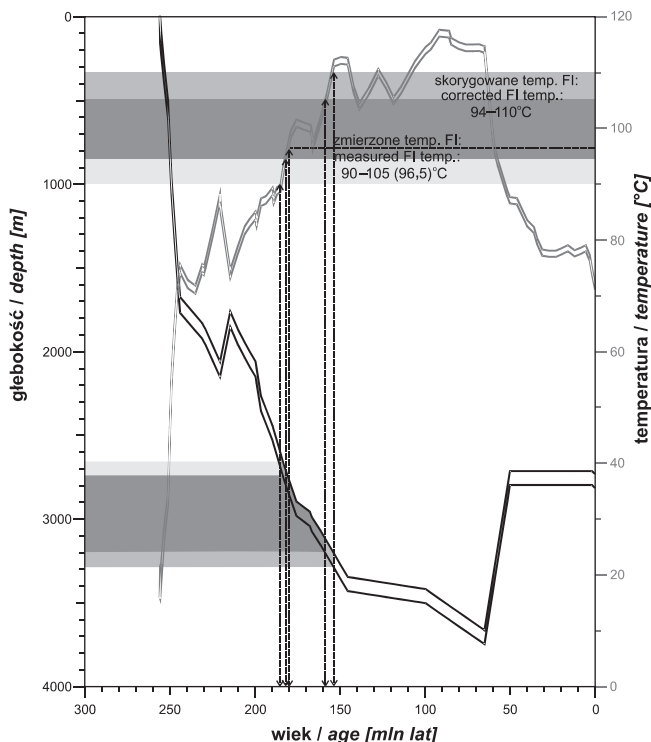


Fig. 5. Zmiany temperatury w zależności od czasu oraz historia pogrzebania obliczona dla stropu i spągu utworów cechsztyńskiego dolomitu głównego przy założeniu stałego strumienia ciepłego w czasie oraz braku 950 m nadkładu skał jurajsko-kredowych

Historia pogrzebania i zmian temperatury w czasie w skałach dolomitu głównego została porównana z wynikami pomiarów inkluzji fluidalnych oraz z czasem, kiedy mierzone inkluzje zostały zamknięte, a następnie skonfrontowana z warunkami pogrzebania w badanym interwale czasu

Burial history and temperature changes with time for the top and bottom of the Main Dolomite (Zechstein), calculated with assumption of constant heat flow in time and 950 m of missing Jurassic–Cretaceous section

Temperature history of the Main Dolomite is confronted with measurements of fluid inclusion temperatures, as well as time when measured fluid inclusion temperatures were achieved, and further confronted with burial conditions at that stage

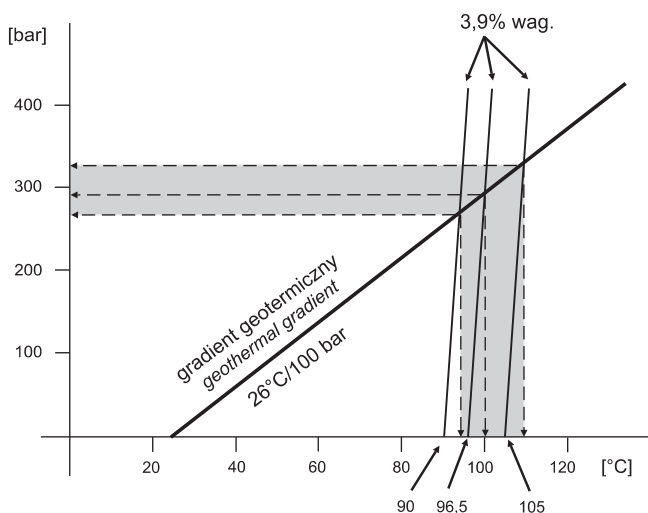


Tabela 2
Dane statystyczne stężenia roztworu i temperatur homogenizacji otrzymanych z inkluzji dwufazowych w cementach anhydrytowych

Statistical summary of data on salinity and homogenization temperature obtained from two-phase fluid inclusions in anhydrite cements

	Średnia	Mediana	Odchylenie standardowe
Stężenie [rw. % wag. NaCl]	3,55	3,95	1,32
Temperatura homogenizacji [°C]	98	96,5	6,39

materii organicznej, która wchodziła w skład bioherm mikrobialnych, powszechnych w skałach dolomitu głównego (Depowska, 1997; Wagner, 2000; Kotarba, Wagner, 2007; Słowakiewicz i in., 2008) lub z procesów dojrzewania materii organicznej pochodzącej ze skał Ca2.

Rekonstrukcja historii termicznej metodą modelowań komputerowych w przypadku utworów dolomitu głównego w otworze wiertniczym Benice-3 jest trudna z powodu niewielkiej ilości danych do kalibracji modelu. Dysponowano jedynie dwoma pomiarami refleksyjności wityritu dla utworów dolomitu głównego (fig. 4). Z tego powodu nie było możliwe odróżnienie wpływu ewentualnych zmian strumienia ciepłego w czasie od wpływu warunków maksymalnego pogrzebania na obserwowaną dojrzałość termiczną w profilu otworu. Stwierdzono, że najprostszy model przyjmujący stały w czasie strumień ciepły nie jest sprzeczny z pomierzonymi wartościami VR_o (fig. 4). Model ten przyjęto w dalszych obliczeniach zmian temperatury utworów dolomitu głównego w czasie.

Odtworzona historia pogrzebania utworów dolomitu głównego obrazuje, że zachodziła ona głównie w dwóch fazach mających miejsce w późnym permie (okres depozycji wyższej części utworów cechsztytu) i we wczesnym triasie, a także w jurze (fig. 5). W środkowym i późnym triasie oraz w kredzie miał miejsce jedynie niewielki wzrost głębokości

Fig. 6. Korekta na ciśnienie obliczona dla systemu chemicznego H₂O–NaCl przy średnim stężeniu solanki 3,9% wag. równoważnika NaCl w otworze wiertniczym Benice-3 na głębokości 2800 m

Temperatury homogenizacji wynoszą odpowiednio: 90; 96,5 i 105°C, a gradient geotermiczny – 26°C/100 barów. Skorygowane wartości temperatury i ciśnienia dla podanych temperatur wynoszą: 94, 100 i 110°C oraz odpowiednio 270, 290 i 330 barów

Plot showing pressure correction for the system H₂O–NaCl calculated for an average salinity of 3.9 wt. % NaCl eq. in well Benice-3 at a depth of 2800 m

Temperatures of homogenization are 90; 96.5 and 105°C, respectively. Calculated geothermal gradient is 26°C/100 bars. Corrected temperatures and pressures for given temperatures of homogenization are: 94, 100, and 110°C, and 270, 290, and 330 bars, respectively

pogrzebania omawianych utworów. Miąższość brakującego nadkładu skał jurajsko-kredowych, usuniętych w czasie laramijskiej inwersji, przyjęto na około 950 m, na podstawie rekonstrukcji paleomiąższości opublikowanej przez Marka i Pajchlową (1997). Przy takich założeniach maksymalna głębokość pogrzebania utworów dolomitu głównego pod koniec kredy wynosiła około 3730 m (fig. 5). Z uwagi na przyjęty model stałego w czasie strumienia ciepłego odtworzone zmiany temperatury utworów dolomitu głównego w czasie są ogólnie proporcjonalne do zmian głębokości ich pogrzebania (fig. 5). Odstępstwa między nimi wiążą się ze zmianami temperatury powierzchniowej, a także zmianami przewodnictwa ciepłego skał w wyniku ich kompaktacji. Odtworzona maksymalna temperatura, osiągnięta przez utwory dolomitu głównego w późnej kredzie, sięga 110°C (fig. 5).

Migracja węglowodorów nastąpiła prawdopodobnie wcześniej niż cementacja anhydrytowa, ale po procesach dolomityzacji, ponieważ węglowodory nie zostały zamknięte w inkluzjach w cementach anhydrytowych i dolomitowych. Dolomityzacja, która na bardzo wczesnym etapie diagenety spowodowała powstanie porowatości międzykrystalicznej i oomoldycznej, przyczyniła się do poprawienia właściwości zbiornikowych. Właściwości te następnie znacznie zredukowano (wypełnienia przestrzeni międzykrystalicznych i porów cementem anhydrytowym) w wyniku działania procesów anhydrytyzacji, powodując zatarcie pierwotnych struktur sedymentacyjnych (Gąsiewicz i in., 1998; Słowakiewicz i in., 2010). Pozostałości po bituminach znalezione w stylolitach i mikrostylolitach oraz szczelinach potwierdzają, że roztwory roponośne migrowały w kierunku platformy wę-

glanowej, gdzie w 1972 roku odkryto złożę ropy naftowej Kamień Pomorski. Szczelinowacenie skał węglanowych odbywało się w różnym czasie (Gąsiewicz i in., 1998), jednak w przypadku otworu wiertniczego Benice-3 szczeliny i stylolity ze śladami migracji węglowodorów powstawały przypuszczalnie po etapie dolomityzacji a przed anhydrytyzacją, o czym świadczą szczeliny zasklepione cementem anhydrytowym. Spękania o średnicy rozwarcia 2–3 cm występujące w najwyższej i środkowej części interwału dolomitu głównego są pochodzenia tektonicznego i zapewne powstawały w późniejszym etapie pogrzebania (Gąsiewicz i in., 1998).

Według Kosakowskiego i in. (2003) generowanie węglowodorów ze skał macierzystych na obszarze platformy węglanowej Kamienia Pomorskiego trwało od późnego triasu do środkowej jury. Przyjęcie triasowego wieku generowania węglowodorów zależy przede wszystkim od modelu ryftowania basenu polskiego w późnym permie–wczesnym triasie (por. Dadlez i in., 1995), który prowadzi do synryftowego podniesienia strumienia ciepłego oraz w następnej kolejności jego postryftowego obniżania się. Taki model jest jednak trudny do sprawdzenia ze względu na ograniczoną ilość danych dojrzałości termicznej dla kalibracji modelu. Skorygowane temperatury precypitacji, zawierające się w przedziale 94 to 110°C, wskazują na stopień pogrzebania płytki do średniego (np. Machel, 2005). Otrzymane wartości temperatury zawierają się w przedziale 75–110°C zmierzonych w inkluzjach w cementach węglanowych Ca₂ w Niemczech (Liedmann, 1992 w: Fischer i in., 2006) oraz wartości temperatury wynikające z analizy izotopów trwałych tlenu 100–150°C (Fischer i in., 2006).

WNIOSKI

Integracja analizy mikrotermometrycznej oraz modelowania historii pogrzebania i termicznej pozwoliła na rekonstrukcję migracji paleofluidów, z których wytrąciły się cemeny anhydrytowe w skałach węglanowych dolomitu głównego. Roztwory zawierały solanki o składzie H₂O–CO₂–NaCl–CaCl₂ i stężeniach 1,6–5,2% wag. równoważnika NaCl. Precypitacja cementów anhydrytowych wystąpiła w temperaturze 94–110°C i ciśnieniu 220–330 barów. Zastosowany model historii pogrzebania przy stałym strumieniu ciepłym pozwolił stwierdzić, że cemeny anhy-

drytowe precypitowały w okresie od wczesnej do późnej jury, tj. ok. 153–181 mln lat temu. Biorąc pod uwagę brak inkluzji ropy naftowej w cencie anhydrytowym, można sądzić, że migracja roztworów niosących węglowodory miała miejsce przed migracją fluidów, które doprowadziły do anhydrytyzacji.

Publikacja jest wynikiem projektu sponsorowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego prowadzonym w PIG nr 61.2804.0701.00.0.

LITERATURA

- BALDWIN B., BUTLER C.O., 1985 — Compaction curves. *Bull. AAPG*, **69**: 622–626.
- BODNAR R.J., 1993 — A method for calculation of fluid inclusion volumes based on vapor bubble diameters and P–V–T–X properties of inclusion fluids. *Economic Geol.*, **78**: 535–542.
- BODNAR R.J., 2003 — Re-equilibration of fluid inclusions. *W: Fluid inclusions: analysis and interpretation* (red. I. Samson i in.). *Miner. Ass. Canada Short Course*, **32**: 213–230.
- BODNAR R.J., VITYK M.O., 1994 — Interpretation of microthermometric data for H₂O–NaCl fluid inclusions. *W: Fluid inc-*

- lusions in minerals, methods and applications (red. B. De Vivo, M.L. Frezzotti): 117–130. Virginia Tech., Blacksburg.
- BURRUSS R.C., 1981 — Hydrocarbon fluid inclusions in studies of sedimentary diagenesis. *W: Short course in fluid inclusions: application to petrology* (red. L.S. Hollister, M.L. Crawford). *Miner. Ass. Canada Short Course Handbook*, **6**: 138–156.
- 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.
- DARLING R.S., 1991 — An extended equation to calculate NaCl contents from final clathrate melting temperatures in H₂O–CO₂–NaCl fluid inclusions: Implications for P–T isochore location. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **55**: 3869–3871.
- DEPOWSKA A., 1997 — Opracowanie litologiczno-facjalne osadów dolomitu głównego w rejonie Gorzowa Wielkopolskiego. Arch. PGNiG, Warszawa.
- DUAN Z., MØLLER N., WEARE J.H., 1992a — An equation of state for the CH₄–CO₂–H₂O system: I. Pure systems from 0 to 1000°C and 0 to 8000 bar. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **56**: 2605–2617.
- DUAN Z., MØLLER N., WEARE J.H., 1992b — An equation of state for the CH₄–CO₂–H₂O system: II. Mixtures from 50 to 1000°C and from 0 to 1000 bar. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **56**: 2619–2631.
- DYJACZYŃSKI K., PAPIERNIK B., PERYT T.M., PROTAS A., WAGNER R., 2000 — Mapa paleogeograficzna dolomitu głównego (Ca₂) 1:500 000. *W: Bilans i potencjał węglowodorowy dolomitu głównego basenu permiego Polski* (red. M. Kotarba). Arch. WGGiOŚ AGH, Kraków.
- FISCHER M., BOTZ R., SCHMIDT M., ROCKENBAUCH K., GARBE-SCHÖNBERG D., GŁODNY J., GERLING P., LITTKER R., 2006 — Origins of CO₂ in Permian carbonate reservoir rocks (Bechstein, Ca₂) of the NW-German Basin (Lower Saxony). *Chemical Geol.*, **227**: 184–213.
- GĄSIEWICZ A., WICHROWSKA M., DARŁAK B., 1998 — Sedymentacja i diagenetyzacja a własności zbiornikowe utworów dolomitu głównego (Ca₂) w polskim basenie cechsztyńskim. *Pr. Państw. Inst. Geol.*, **165**: 195–206.
- GOLDSTEIN R.H., REYNOLDS T.J., 1994 — Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals. SEPM Short Course 31, Tulsa.
- JANATIEWA O.K., 1946 — Polytherms of solubility of salts in the tropic systems CaCl₂–MgCl₂–H₂O and CaCl₂–NaCl–H₂O. *Zhurnal Prikladnoi Khimii*, **19**: 709–722.
- JERMAKOW N.P., 1972 — Geochemические системы включений в минералах. Nerda, Moskwa.
- KOTARBA M., 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.*, **12**, 1: 1025–1036.
- KOSAKOWSKI P., BURZEWSKI W., KOTARBA M.J., 2003 — Potencjał naftowy utworów dolomitu głównego w strefie Kamienia Pomorskiego. Cz. 2. Analiza ropotwórczości. *Prz. Geol.*, **51**, 8: 663–672.
- LARSON L.T., MILLER J.D., NADEAU J.E., ROEDDER E., 1973 — Two sources of error in low temperature inclusion homogenization determination and corrections on published temperatures for the East Tennessee and Laisvall deposits. *Economic Geol.*, **68**: 113–116.
- MACHEL H.G., 2005 — Investigations of burial diagenesis in carbonate hydrocarbon reservoir rocks. *Geoscience Canada*, **32**: 103–128.
- MAREK S., PAJCHŁOWA M. (red.), 1997 — Epikontynentalny perm i mezozoik w Polsce. *Pr. Państw. Inst. Geol.*, **153**.
- MIKOŁAJEWSKI Z., 2007 — Opracowanie profilów litologiczno-mikrofacjalnych dla ok. 20 odwiertów. *W: System geochemiczno-generacyjny utworów dolomitu głównego na obszarze Pomorza Zachodniego* (red. R. Wagner, M. Kotarba). Arch. PGNiG S.A., Warszawa.
- OAKES C.S., BODNAR R.J., SIMONSON J.M., 1990 — The system NaCl–CaCl₂–H₂O: I. The ice liquidus at 1 atm total pressure. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **54**: 603–610.
- ROEDDER E., 1984 — Fluid inclusions. *Miner. Soc. Amer. Rev. Miner.*, **12**.
- SŁOWAKIEWICZ M., 2003 — Fluid inclusion data in calcite from the Upper Triassic hot-spring travertines in southern Poland. *J. Geochem. Explor.*, **78**: 123–126.
- SŁOWAKIEWICZ M., MIKOŁAJEWSKI Z., SIKORSKA M., 2008 — Mikrofacje i diagenetyzacja barierowych utworów dolomitu głównego (Ca₂) na obszarze Pomorza Zachodniego. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **429**: 187–194.
- SŁOWAKIEWICZ M., MIKOŁAJEWSKI Z., SIKORSKA M., POPRAWA P., 2010 — Origin of diagenetic fluids in the Zechstein Main Dolomite reservoir rocks, West Pomerania, Poland. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, **161**: 25–38.
- SWEENEY J.J., BURNHAM A.K., 1990 — Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics. *Bull. AAPG*, **74**: 1559–1570.
- WAGNER R., 2000 — Charakterystyka facjalna i paleogeograficzna utworów dolomitu głównego. *W: Potencjał i bilans generowania utworów dolomitu głównego basenu permiego Polski – Blok II* (red. M. Kotarba). Arch. BG Geonafita, Warszawa.