

## Analiza inkluzji fluidalnych w minerałach skał kambryjskich na Morzu Bałtyckim

Katarzyna Jarmołowicz-Szulc<sup>1</sup>, Grzegorz Leśniak<sup>2</sup>



**Fluid inclusion analysis of minerals in the Cambrian rocks in the Baltic Sea.** *Prz. Geol.*, 73: 386–390; doi: 10.7306/2025.40

*Abstract.* Petrological and mineralogical studies have been conducted aiming at microscopic search for hydrocarbons in the Baltic area. Fluid inclusion analysis was performed in the samples from the depth interval from 1770.8 m to 2180.41 m. Minerals studied were: quartz and calcite. One type of inclusions has been observed – two phase brine inclusions (AQFI). These inclusions homogenize in liquid in temperatures of 92.6–97.3 and 100–166.3°C. No hydrocarbon inclusions (HCFI) were present in the rocks of the well.

K. Jarmołowicz-Szulc    G. Leśniak

**Keywords:** fluid inclusions, Cambrian rocks, Baltic Sea, petrology

Badania petrograficzno-mineralogiczne (w tym inkluzji fluidalnych) przeprowadzono w kambryjskich piaskowcach w zakresie głębokości od 1770,8 m do 2180,41 m.

Prace badawcze podejmowane dla rozpoznania inkluzji fluidalnych w odniesieniu do spoiwa skalnego miały na celu zbadanie takich parametrów jak: pomiar temperatur homogenizacji, wykorzystanie inkluzji jako termometru geologicznego oraz ocenę stosowalności metody. Porównywalne badania inkluzji fluidalnych były wykonywane dla skał kambryjskich na obszarze Morza Bałtyckiego *on-shore* i *off-shore*, np. w rejonie Żarnowca i na obszarze Wyniesienia Łeby (Jarmołowicz-Szulc, 1995, 1998, 2001).

Celem niniejszej pracy jest zestawienie uzyskanych wyników badawczych dla wybranego otworu, ich analiza i podsumowanie.

### ZAŁOŻENIA METODYKI I METODA BADAŃ

Badania inkluzji ciekło-gazowych opierają się na założeniu, że minerały wypełniające przestrzeń porową skał osadowych mogą w trakcie krystalizacji zamykać w swych mikroszczelinach niewielkie ilości fluidów krążących w przestrzeni porowej (Roedder, 1984). Takie inkluzje stanowią reliktove porcje nieistniejących już obecnie roztworów. Badając je pod kątem ich zachowania w trakcie podgrzewania i zamrażania, można zrekonstruować pierwotne warunki tworzenia minerałów, określić skład i gęstość paleofluidów, przy czym podstawą stosowalności metody badań inkluzji fluidalnych jest niezmiennosc ich pierwotnych parametrów objętości i składu.

Prace badawcze prowadzono według przyjętego wcześniej schematu (*vide*: Jarmołowicz-Szulc, 1997), który swym zakresem obejmuje zarówno badania wstępne (mikroskopowa ocena materiału, selekcja próbek badawczych) oraz charakterystykę inkluzji wraz ze studium fluorescencji, jak i zasadnicze badania temperaturowe (zamrażanie, podgrzewanie). Badania inkluzji fluidalnych przeprowadzono mikroskopowo w specjalnych dwustronnie polerowanych płytkach z użyciem aparatury zamrażająco-grzewczej – stolika firmy Linkam z oprogramowaniem komputerowym

i sterowaniem automatycznym oraz zestawu fluorescencyjnego Nikon (nadfiolet i światło niebieskie). Preparaty badawcze zostały przygotowane z zastosowaniem standardowej procedury przygotowawczej na zimno na Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie (Goldstein, Reynolds, 1994). Obserwacje prowadzono mikroskopowo w świetle przechodzącym i we fluorescencji celem przesłedzenia (potencjalnej) obecności ciekłych węglowodorów (Jarmołowicz-Szulc, 1997).

Grzanie i zamrażanie próbek na stolikach zamrażająco-grzewczych przeprowadzono w zakresie temperatur od pokojowej (23°C) do 220°C i do –196°C, stosując standardowe techniki analityczne (Sheppard, 1985; Goldstein, Reynolds, 1994; Jarmołowicz-Szulc, 1997, 2001, 2009a, b; Samson i in., 2003). Przy obliczeniach zasolenia korzystano z programu FLINCOR (Brown, 1989) i FLUIDS (Bakker, Brown, 2003). Poza badaniami inkluzji *sensu stricto* dla skał z badanych regionów prowadzono także oznaczenia petrologiczne, mineralogiczne i geochemiczne, które swym zakresem wspomagały analizę inkluzji.

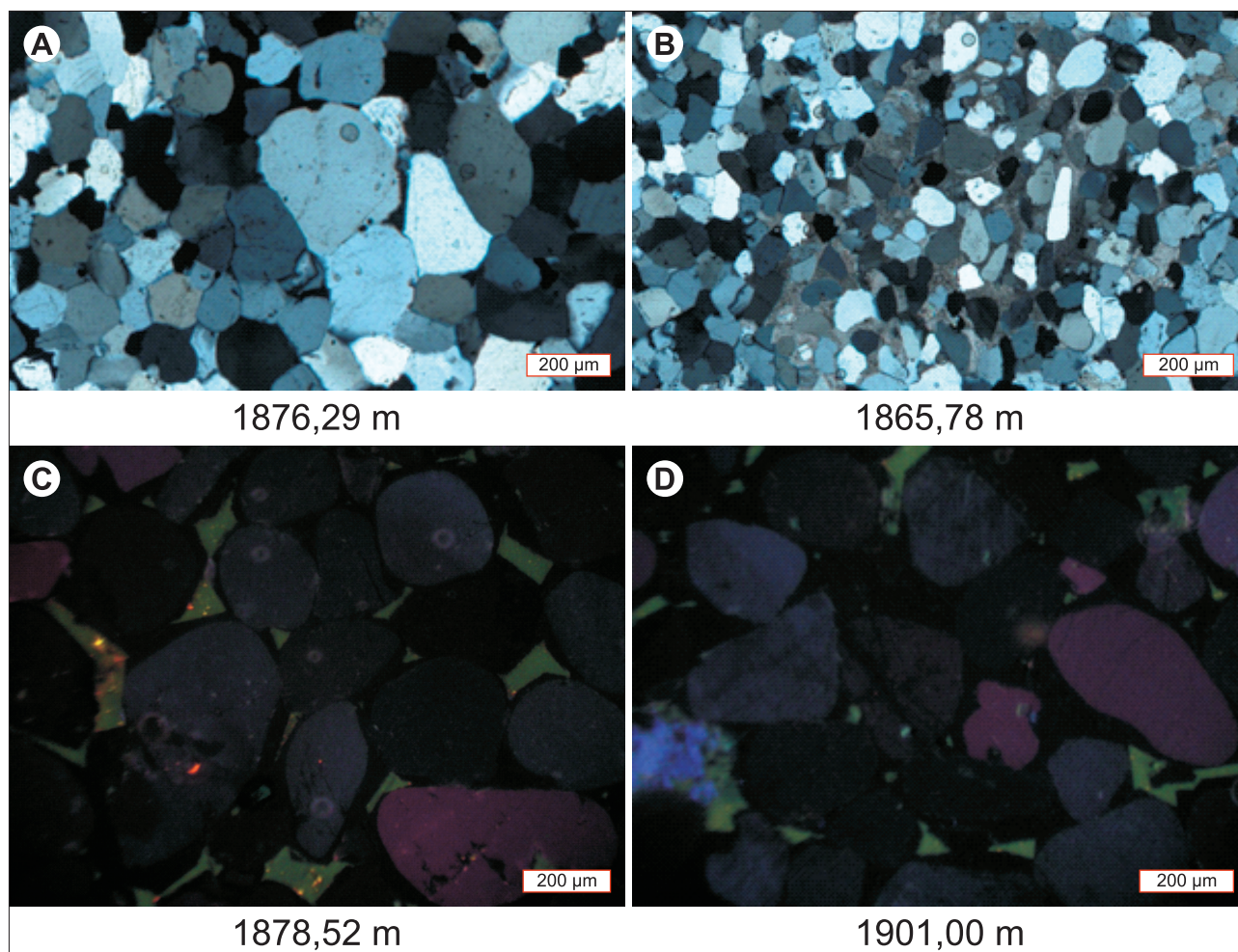
### WYNIKI PRZEPROWADZONYCH PRAC

Inkluzje fluidalne badano w otworze wiertniczym we wkładkach piaskowcowych i wapieniach oraz arenitach kwarcowych. W pracy są prezentowane wyniki dla skał kambru środkowego i górnego.

Analizowane skały są wykształcone w głównej mierze jako drobnopiezarniste arenity kwarcowe, o dobrym i bardzo dobrym stopniu wysortowania, kontaktach prostych oraz wklesło-wypukłych (ryc. 1). Szkielet ziarnowy jest zdominowany przez kwarc (65 do 92% obj. składników w skale), prawie 100% ziaren w szkielecie. Zaobserwowano występowanie ziaren pochodzących z plutonicznych skał magmowych, metamorficznego (dominują) oraz pojedynczych ziaren pochodzenia efuzywnego. W miejscach występowania spoiwa kalcytowego zaobserwowano ślady korozji ziaren kwarcu przez kalcyt. Prawdopodobnie mamy tutaj do czynienia z dwoma generacjami kwarcu neogenicznego. Kontakty ziaren pierwotnie ostre przekształciły się w roz-

<sup>1</sup> Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; [katarzyna.jarmolowicz-szulc@pgi.gov.pl](mailto:katarzyna.jarmolowicz-szulc@pgi.gov.pl); ORCID ID: 0000-0001-7927-1820

<sup>2</sup> Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Lubicz 25A, 31-503 Kraków; [lesniak@inig.pl](mailto:lesniak@inig.pl); ORCID ID: 0000-0003-44364108



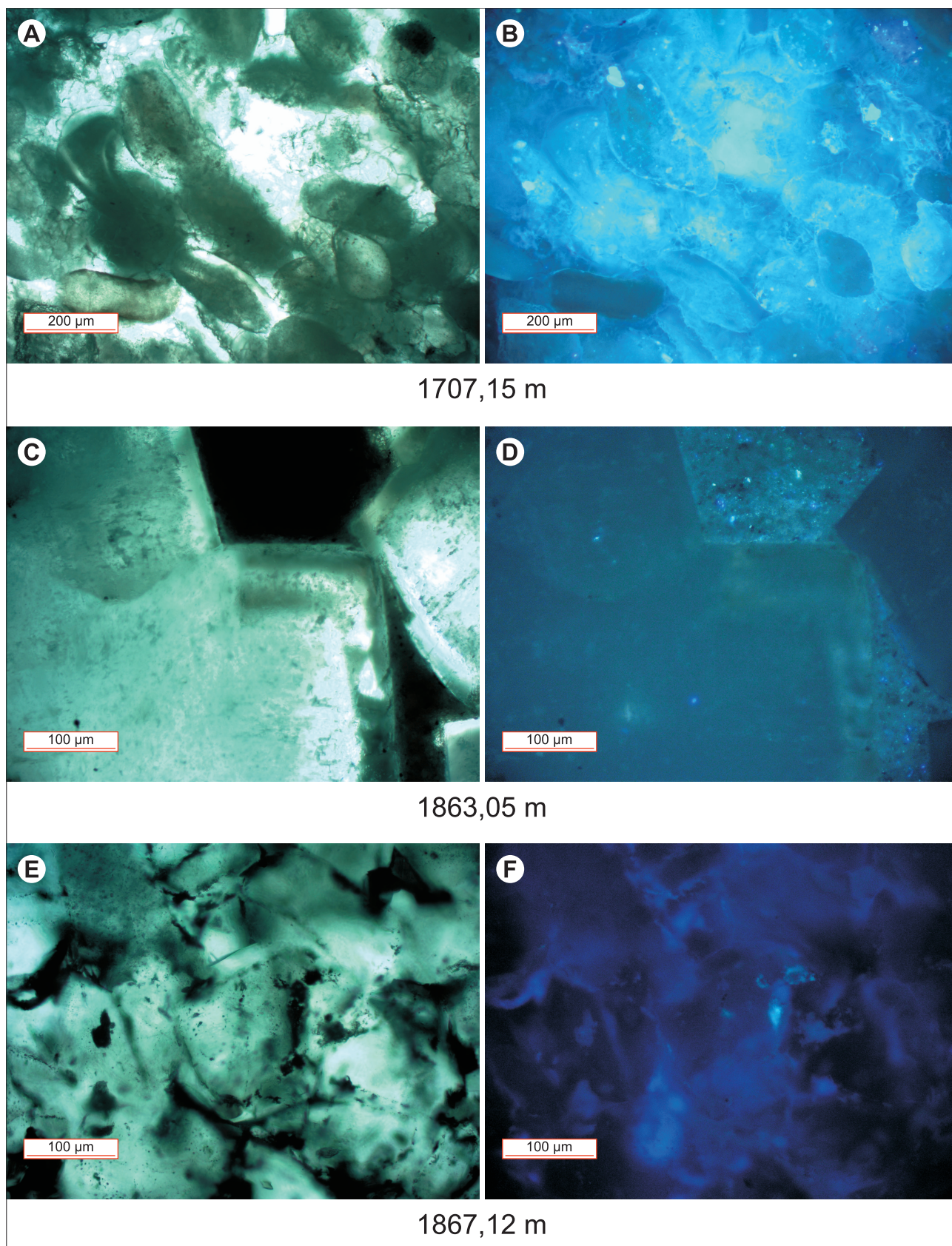
**Ryc. 1.** Charakterystyka petrograficzna skał. **A** – próbka z głęb. 1876,29 m (kambryjśrodkowy). Cement węglanowy, zabudowujący przestrzeń porową na ograniczonym obszarze. Nikole skrzyżowane; **B** – próbka z głęb. 1865,78 m (kambryjśrodkowy). Cement kwarcowy w postaci niepełnych obwódek na ziarnach kwarcu w drobnoziarnistym arenicie kwarcowym. Nikole skrzyżowane; **C** – próbka z głęb. 1878,52 m. Ziarna kwarcu magmowego i metamorficznego. Część kontaktów wklęsło-wypukłych. Obwódki kwarcowe o zróżnicowanej wielkości; **D** – próbka z głęb. 1901,00 m. Ziarna kwarcu pochodzenia metamorficznego i magmowego. Kontakty wklęsło-wypukłe w części ziaren świadczą o początkowych warunkach sedymentacji. Obwódki kwarcu autigenicznego przechodzą w cement porowy. Po lewej stronie kaolinit zabudowujący przestrzeń porową. Skala 200 µm

**Fig. 1.** Petrographic character of rocks. **A** – sample from the depth of 1876.29 m (middle Cambrian). Carbonate cement filling in the porous space in limited extent. Crossed polarizes; **B** – sample from the depth of 1865.78 m (middle Cambrian). Quartz cement in form of incomplete rims over the quartz grains in the fine grained quartz arenite. Crossed polarizes; **C** – sample from the depth of 1878.52 m. Grains of magmatic and metamorphic quartz. Some contacts are concave-convex. Quartz rims are differentiated in size; **D** – sample from the depth of 1901.00 m. Grains of magmatic and metamorphic quartz. The concave-convex contacts in some grains point to primary conditions of sedimentation. On the left side – kaolinite filling in the porous space. Scale bars 200 µm

myte. Sprawia to wrażenie budowy mozaikowej. Część ziaren kwarcu jest pokruszona / spękana. Poza kwarcem w szkielecie ziarnowym obserwuje się także pojedyncze wystąpienia skaleni potasowych, litoklastów (skały wylwne i kwarcyty), muskowitu, a także minerałów akcesorycznych (monacyt, cyrkon, turmalin) i nieprzezroczystych (piryt). Dominuje tu cement kwarcowy autigeniczny, wykształcony jako obwódki na ziarnach detrytycznych oraz jako cement porowy (zabudowujący pory, częściowo przekształcony z obwódek). Część kwarcu budującego obwódki wykształcona jest w postaci heksagonalnych kryształów, co świadczy o jego wzroście w pustych porach. W części próbek obserwowano częściowo zniekształcone kryształy. Obserwacje w katodoluminescencji wskazują na dwie generacje cementu kwarcowego. Jego udział waha się od ok. 2 do 22% obj. (średnio ok. 9% obj.). Zaobserwowano również cement węglanowy (często o składzie dolomitu żelazistego), którego udział może sięgać 9% obj., zwykle jednak

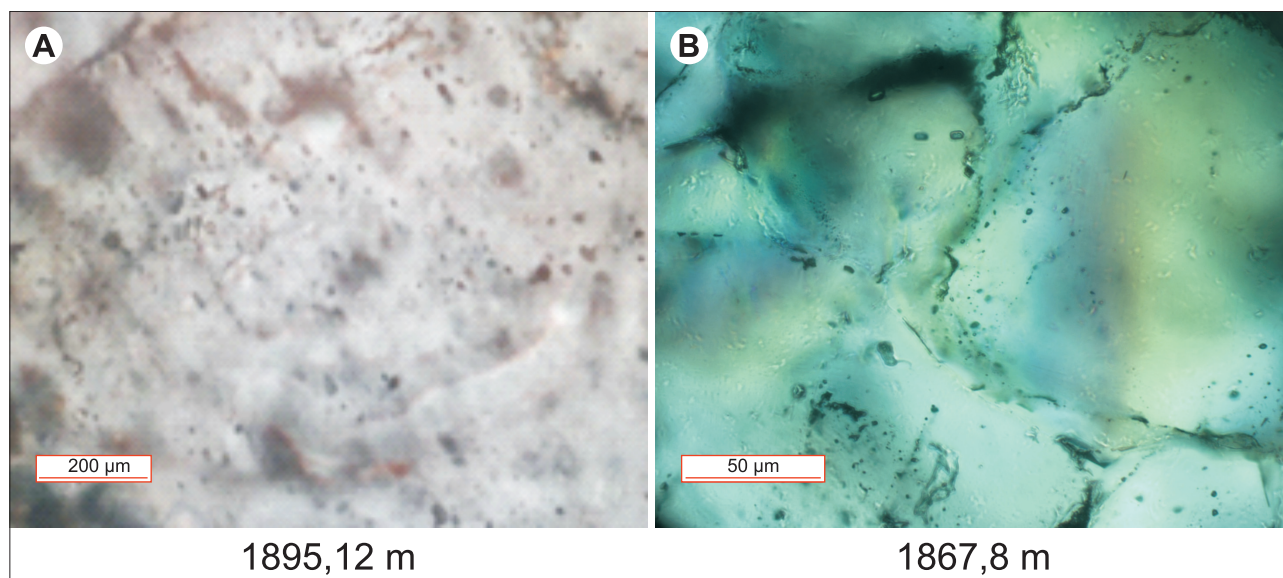
jest znacznie niższy i nie przekracza 1% obj. Obserwuje się także minerały ilaste – illit i kaolinit. Cement illitowy zabudowuje większość porów i znacznie ogranicza porowatość. W niektórych próbkach sprawia wrażenie jakby tworzył obwódki illitowe na ziarnach detrytycznych. Kaolinit krystalizuje w części porów, jego udział rzadko jednak przekracza 1% obj., tworzy on spoiwo o charakterze porowym (wypełnia puste pory) Ogólnie spoiwo jest niejednorodne i nierównomiernie rozmieszczone. Porowatość przebadanych arenitów cechuje duża zmienność, a jej udział waha się od <0,5 do blisko 18% obj.

Jak to wynika z opisu petrograficznego, badane pod kątem inkluzji fluidalnych próbki skał to jasne, czasem rudawe piaskowce kwarcowe o głównie o spoiwie węglanowym, kwarcowym, przecięte jasnymi żyłkami węglanowymi i ciemnymi szlirami. Przykładowo są pokazane na figurze w świetle przechodzącym i nadfioletcie (ryc. 2). Ziarna detrytyczne są często obtoczone, jajowate, podłużne



**Ryc. 2.** Charakterystyka minerałów w skałach. **A–B** – obtoczone ziarna detrytyczne w spoiwie węglanowym: światło spolaryzowane (**A**), nadfiolet (**B**); **C–D** – romboedry węglanowe: światło spolaryzowane (**C**), nadfiolet (**D**); **E–F** – ziarna kwarcu spojone kwarcem: światło spolaryzowane (**E**), nadfiolet (**F**). Brak fluorescencji inkluzji fluidalnych. Niewielkie rozświetlenia na obrazie w UV są związane z ciemnymi nagromadzeniami (?materia organiczna)

**Fig. 2.** Characteristics of minerals in rocks of the borehole. **A–B** – rounded detrital grains in carbonate cement: polarized light (**A**), ultraviolet light (**B**); **C–D** – carbonate rhombohedra: polarized light (**C**), ultraviolet light (**D**); **E–F** – quartz grains cemented with quartz: polarized light (**E**), ultraviolet light (**F**). No fluorescence of fluid inclusions. Small enlightening in the UV images correspond to dark accumulations (?organic matter)



**Ryc. 3.** Dwufazowe inkluzje w minerałach. **A** – inkluzje o charakterze pseudowtórnym. Próbkę z głębokości 1895,12 m. Światło przechodzące. Zdjęcie próbki na stoliku Lincam; **B** – pierwotne i wtórne inkluzje w kwarcu i spoiwie kwarcowym. Próbkę z głębokości 1867,8 m. Światło spolaryzowane, 1 nikol

**Fig. 3.** Inclusions in minerals. **A** – two phase inclusions of pseudo-secondary character. Sample from the depth of 1895.12 m. Transmitted light. Image from the Lincam stage; **B** – primary and secondary inclusions in quartz and quartz cement. Sample from the depth of 1867.8 m. Polarized light, one polarizer

(próbka gł. 1770,8 m; ryc. 2A). Niekiedy spoiwo tworzy krystaliczne obwódki dookoła ziaren. Jak wynika z badań fluorescencji pod kątem diagnozy potencjalnych węglowodorów w inkluzjach, zarówno w nadfiolecie, jak i w świetle niebieskim inkluzje nie wykazują świecenia (ryc. 2B).

W węglanach (romboedry) występują nieliczne inkluzje fluidalne, małe (1–2 μm), niekiedy tworzące skupienia. Nie zaobserwowano inkluzji jednofazowych. Co charakterystyczne, przy budowie pasowej zewnętrzna część nie zawiera żadnych inkluzji w przeciwieństwie do wnętrza (ryc. 2C). We wszystkich minerałach wzrostki są dwufazowe, pierwotne, pseudowtórne lub wtórne (ryc. 3). Nie zaobserwowano intensywnej fluorescencji inkluzji fluidalnych w węglanach (ryc. 2D) ani w kwarcu. „Kropelkowe” świecenie jest zauważalne w ciemnych skupieniach i/lub na spękaniach wypełnionych ciemnymi wzrostkami (np. próbka gł. 1863,05 m).

Głębiej w otworze, w jasnym gruboziarnistym piaskowcu kwarcowym z niewielkimi ciemnymi skupieniami (próbka gł. 1879,0 m) również nie zaobserwowano intensywnej fluorescencji inkluzji fluidalnych. Świecenie jest zauważalne jedynie w ciemnych skupieniach. Inkluzje fluidalne nie występują w spoiwie, są liczne tylko w materiale detrytycznym, przy czym niektóre o charakterze wtórnym mają układ liniowy i ich asocjacje wydają się przecinać więcej niż jedno ziarno.

Mikrotermometrycznie badano inkluzje wydłużone, dwufazowe. Wyniki analiz (wartości  $T_e$ ,  $T_m$ ,  $T_h$ ) przedstawiono w tabeli 1. Zaobserwowano także inkluzje pozornie dwufazowe, a w rzeczywistości typu L1 + L2 (dwie cieczy). Nie powiodła się próba zdiagnozowania charakteru fluidów L1 i L2 z uwagi na ciemne wnętrza poszczególnych wzrostków.

## DYSKUSJA I PODSUMOWANIE

Inkluzje fluidalne w badanym materiale wiertniczym są nieliczne i mają mało zróżnicowany charakter. Występują rzadko w cementie kwarcowym, niekiedy wiążą się

z węglanami (kalcyt, dolomit) i/lub anhydryt. Najliczniej występują w ziarnach detrytycznych oraz we wtórnych zabliźnieniach kwarcem spękań i mikroszczelin (por. Jarmołowicz-Szulc, 1998, 1999). W piaskowcach występuje jeden typ inkluzji – wodnych/solankowych (AQFI). Brak jest natomiast inkluzji węglowodorowych. Wrostki nie wykazują fluorescencji w barwach biało-niebieskich. Tym samym potwierdza się przypuszczenie o braku węglowodorów w badanym otworze.

Wrostki ciekło-gazowe występujące w badanych spoiwach skał mają jednolity charakter. Są wypełnione solanką (AQFI) (por. Jarmołowicz-Szulc, 2001). Ich wielkość oscyluje w granicach od 1 do 3 μm dla inkluzji solankowych, a inkluzji węglowodorowych (HCFI) brak. Inkluzje mają charakter pierwotny i wtórny. Inkluzje „wodne” występują na granicy kwarcu detrytycznego i w późnych wypełnieniach mikrospekkań. Częste są w ziarnach detrytycznych, które bywają spękanie.

Inkluzje dwufazowe wodne zbadane w skałach otworu homogenizują w fazę ciekłą w temperaturach 92,6–97,3°C oraz 100–166,3°C (tab. 1), zasolenie fluidów jest rzędu kilku procent. Wartości temperaturowe można interpretować jako przybliżenie temperatury uwięzienia fluidów solankowych w minerałach.

Dyskutując uzyskane wyniki analiz dla badanego otworu, trzeba zdawać sobie sprawę z tego, że w studiach diagenetyzacji istnieją dwa zasadnicze problemy związane z interpretacją wyników badań inkluzji fluidalnych. Nawet jeśli świadectwa petrograficzne wskazują na uwięzienie wzrostków w czasie wzrostu kryształu, to wartości temperatur topnienia i homogenizacji mogą być zmienne z powodu reekwilibracji (Goldstein, Reynolds, 1994). Kryształy, które tworzyły się w mieszanych fluidach mogą mieć szeroki zakres temperatur topnienia lodu, co jest zgodne ze zmiennością zasolenia. Głębokie pogrzebanie może spowodować rozciąganie i cieknięcie inkluzji (*stretching, leakage*), natomiast inkluzje uwięzione w niskich temperaturach mogą pozostać niestabilne w czasie ogrzewania związane-

**Tab. 1.** Wyniki badań mikrotermometrycznych inkluzji fluidalnych w minerałach z badanego otworu wiertniczego  
**Table 1.** FI microthermometric results in minerals from the borehole studied

| Region – Morze Bałtyckie<br>The Baltic region<br>Nr próbki<br>Sample No. | Głębokość próbki<br>Sample depth [m] | Typ spoiwa / mineral<br>Cement type / mineral | Temperatura homogenizacji<br>Homogenization temperature<br>$T_h$ [°C] | Temperatura eutektyku<br>Eutectic temperature<br>$T_e$ [°C] | Temperatura topnienia lodu<br>Ice melting temperature<br>$T_{m\ ice}$ [°C] | FI                    |
|--|--------------------------------------|---|---|---|--|-----------------------|
| 1  | 1770,80                              | węglan, ?anhydryt<br>carbonate, ?anhydrite    | 92,6  | -44   | -6,3   |                       |
| 2  | 1837,35                              | kwarc z glaukonitem<br>quartz with glauconite | 96,4  | -21,3   | -4,2   | AQ                    |
| 3  | 1863,05                              | dolomit / dolomite                            | 103,3   |   | -3,3   | AQ                    |
| 5  | 1872,45                              | kwarc / quartz                                | 120   |   | -3,2   |                       |
| 6  | 1879,00                              | kwarc / quartz                                | 100   |   | -3,3   | AQ                    |
| 9  | 1895,12                              | kwarc / quartz                                | 74,5<br>163   |   | -4,2   |                       |
| 10   | 1899,70                              | kwarc / quartz                                | 139,8<br>29   |   | od -4,2 do -3,7  | AQ<br>CO <sub>2</sub> |
| 11   | 1901,65                              | kwarc / quartz                                | 97,3  | AQFI  | -3,2   |                       |
| 12   | 1902,50                              | kwarc / quartz                                | 166,8   | -21,3<br>AQFI   | -8,2 do -4,8   |                       |

go z pogrzebaniem (Roedder, 1984; Goldstein, Reynolds, 1994; Samson i in., 2003).

Jednakże, o ile w badanych próbkach nie zaobserwowano symptomów cieknięcia, wyniki zamrażania inkluzji ( $T_m$ ), a co za tym idzie estymację zasolenia, można uznać za miarodajne.

### WNIOSKI

1. W cementach skał kambryjskich dwufazowe inkluzje fluidalne są nieliczne.

2. Zasolenie fluidu w inkluzjach oscyluje w różnych przedziałach, podobnie jak i gęstość fluidów, i wykazuje zmienność z głębokością i charakterem spoiwa.

3. Badania mikrotermometryczne pokazują charakter paleofluidów i sugerują istnienie na ogół prostych, choć czasem bardziej złożonych układów solankowych – np. H<sub>2</sub>O-NaCl-CaCl<sub>2</sub>-MgCl<sub>2</sub>, oraz obecność fluidów mieszanych, w tym H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>.

4. W skałach nie zaobserwowano inkluzji wypełnionych węglowodorami, a co za tym idzie – w otworze nie stwierdzono obecności węglowodorów.

5. Analiza inkluzji fluidalnych wykazała, że w części próbek inkluzje o charakterze wtórnym są małe i często związane ze spękaniem w ziarnach, z reguły mają one układ liniowy i ich asocjacje wydają się przecinać więcej niż jedno ziarno. Często układają się one w linie tnące ziarno detrytyczne i potencjalną obwódkę kwarcową.

6. W większości profili otworów w kambrze środkowym obserwuje się występowanie inkluzji zawierających węglowodory. Czy zatem brak inkluzji w analizowanym profilu wskazuje na istnienie w tym rejonie bariery ograniczającej migrację węglowodorów, czy też na bardzo wczesną cementację w stosunku do pozostałych profili?

7. Należałoby się również zastanowić, czy nie mogło dojść do rekryształizacji cementów i uwolnienia zamkniętych w nich węglowodorów, a jeśli tak – na drodze jakiego procesu jest to możliwe.

Autorzy składają serdeczne podziękowania recenzentowi – prof. Stanisławowi Wołkowiczowi, za życzliwość i cenne uwagi, które pozwoliły na podniesienie jakości manuskryptu.

### LITERATURA

- BAKKER R.J., BROWN P.E. 2003 – Computer modeling in fluid inclusion research. [W:] Samson I., Anderson A., Marshall D. (red.), Fluid inclusions. Mineralogical Association of Canada. Short Course, 32: 185–203.
- BROWN P.E. 1989 – FLINCOR: A microcomputer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data. American Mineralogist, 74 (11): 1390–1393.
- GOLDSTEIN R.H., REYNOLDS T.J. 1994 – Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals, SEPM Short Course, 31.
- JARMOŁOWICZ-SZULC K. 1995 – Fluid inclusions in diagenesis of sandstones. XIII ECROFI, Sitges-Barcelona. Boll. Espanola Min. 18 (1): 1–2 (Supplement).
- JARMOŁOWICZ-SZULC K. 1997 – Zastosowanie inkluzji fluidalnych w cementach skał paleozoiku Niżu Polskiego w poszukiwaniach ropy i gazu. Arch. Państw. Inst. Geol., 2/98: 1–36.
- JARMOŁOWICZ-SZULC K. 1998 – Quartz cements in the Cambrian sandstones, Żarnowiec region, N Poland: a fluid inclusion study. Geological Quarterly 42 (3): 311–318.
- JARMOŁOWICZ-SZULC K. 1999 – Systematyka inkluzji fluidalnych w wypełnieniach przestrzeni porowej skał osadowych paleozoiku Niżu Polskiego. Przegląd Geologiczny, 47 (6): 542–546.
- JARMOŁOWICZ-SZULC K. 2001 – Badania inkluzji fluidalnych w spoiwie kwarcowym piaskowców kambru środkowego na obszarze Bloku Łeby w Morzu Bałtyckim – implikacje diagenetyczne, izotopowe i geochemiczne. Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego, 399: 1–90.
- JARMOŁOWICZ-SZULC K. 2009a – Recent contribution to mineralogical and geochemical studies in the Carpathians. Mineralogical Review 59 (2): 42–55 (ang. ze streszczeniem ukr. i ros.).
- JARMOŁOWICZ-SZULC K. 2009b – Mineralogical and geochemical approach to fissure fillings in selected Carpathian units. XX ECROFI. Fluid and melt inclusions: using bubbles to decode the Earth. 21–27 September, 2009, Granada, Spain. Programme and Abstracts, 119–120.
- ROEDDER E. 1984 – Reviews in Mineralogy, Fluid Inclusions, 12, Miner. Soc. Amer., 1–254.
- SAMSON I., ANDERSON A., MARSHALL D. (eds.). 2003 – Fluid inclusions. Mineralogical Association of Canada. Short Course, 32: 1–374.
- SHEPHERD T.J., RANKIN A.H., ALDERTON D.H.M. 1985 – A practical guide to fluid inclusion studies. Blackie, New York.

Praca wpłynęła do redakcji 13.03.2025 r.  
 Akceptowano do druku 24.03.2025 r.