

Petrografia i mineralogia łupków niższego paleozoiku kratonu wschodnioeuropejskiego oraz piaskowców karbonu podłoża monokliny przedsudeckiej

Magdalena Sikorska-Jaworowska¹, Marta Kuberska¹, Aleksandra Kozłowska¹



M. Sikorska-Jaworowska

M. Kuberska

A. Kozłowska

Petrography and mineralogy of the lower Palaeozoic shales from the East European Craton and Carboniferous sandstones from the basement of the Fore-Sudetic Homocline. *Prz. Geol.*, 64: 963–967.

A b s t r a c t. The study deals with clay-silt shales occurring in the lower Palaeozoic basin at the western slope of the East European Craton, and sandstones known from the Carboniferous Basin of SW Poland (basement of the Fore-Sudetic Homocline). The clay groundmass of the shales consists largely of illite, and the silt fraction is made up of quartz with a variable admixture of feldspars. Quartz and carbonate cements are common, while pyrite, kaolinite and phosphate cements are rare. The clay groundmass reveals microporosity in the form of microchannels paralleling illite plates, and visible with in mica packets. Carboniferous sandstones are represented

mostly by sublithic or subarkosic wackes and rarely by lithic, sublithic or subarkosic arenites. The pore space between sand grains is completely filled by clayey matrix. Both porosity and permeability are very low in the sandstones.

Keywords: *Petrology, lower Palaeozoic, Carboniferous, East European Craton, SW Poland, unconventional hydrocarbons*

Analiza petrologiczna jest nieodłączną częścią badań skał ilasto-mułowcowych oraz piaskowcowych, które prowadzi się w celu wyznaczenia poziomów perspektywicznych występowania niekonwencjonalnych złóż węglowodorów. W przypadku łupków gazonośnych istotna jest zawartość w nich minerałów ilastych oraz udział fazy pęczniającej, a także kwarcu, skaleni i węglanów. Składniki te istotnie wpływają na zachowanie się skał w procesie hydraulicznego kruszenia. Natomiast dla gazu zamkniętego w piaskowcach podstawowe znaczenie ma udział i charakter spoiwa oraz cementów, które kształtują przestrzeń porową. W trakcie wykonywania analiz zwrócono także uwagę na występowanie mikrospękań w łupkach i piaskowcach.

Celem artykułu jest przedstawienie najważniejszych wyników badań i analiz laboratoryjnych osadów pochodzących z dwóch basenów sedymentacyjnych: wczesnopaleozoicznego w NE i SE Polsce (regiony bałtycki i podlasko-lubelski oraz obszar Biłgoraj-Narol) – w aspekcie obecności ropy i gazu łupkowego oraz basenu karbońskiego w SW Polsce – pod kątem gazu zamkniętego i gazu z łupków.

Analizy zostały przeprowadzone w mikroskopie polaryzacyjnym, skaningowym mikroskopie elektronowym i katodoluminescencji (CL). Ponadto wykorzystano wyniki badań porozymetrycznych oraz analiz rentgenowskich (XRD) wykonanych na potrzeby niniejszego projektu w Instytucie Nafty i Gazu – PIB w Krakowie (Opracowanie..., 2015).

KRATON WSCHODNIOEUROPEJSKI

Badania mikroskopowe drobnoziarnistych skał niższego paleozoiku na zachodnim skłonie kratonu wschodnio-

europejskiego (basen bałtycki i podlasko-lubelski) wykazały z jednej strony monotony charakter petrograficzny badanych osadów, a z drugiej – dużą zmienność ilościowego składu mineralnego, przy jednoczesnym stałym składzie jakościowym. Jest to wynikiem występowania laminacji w badanych skałach, niekiedy widocznej dopiero pod mikroskopem.

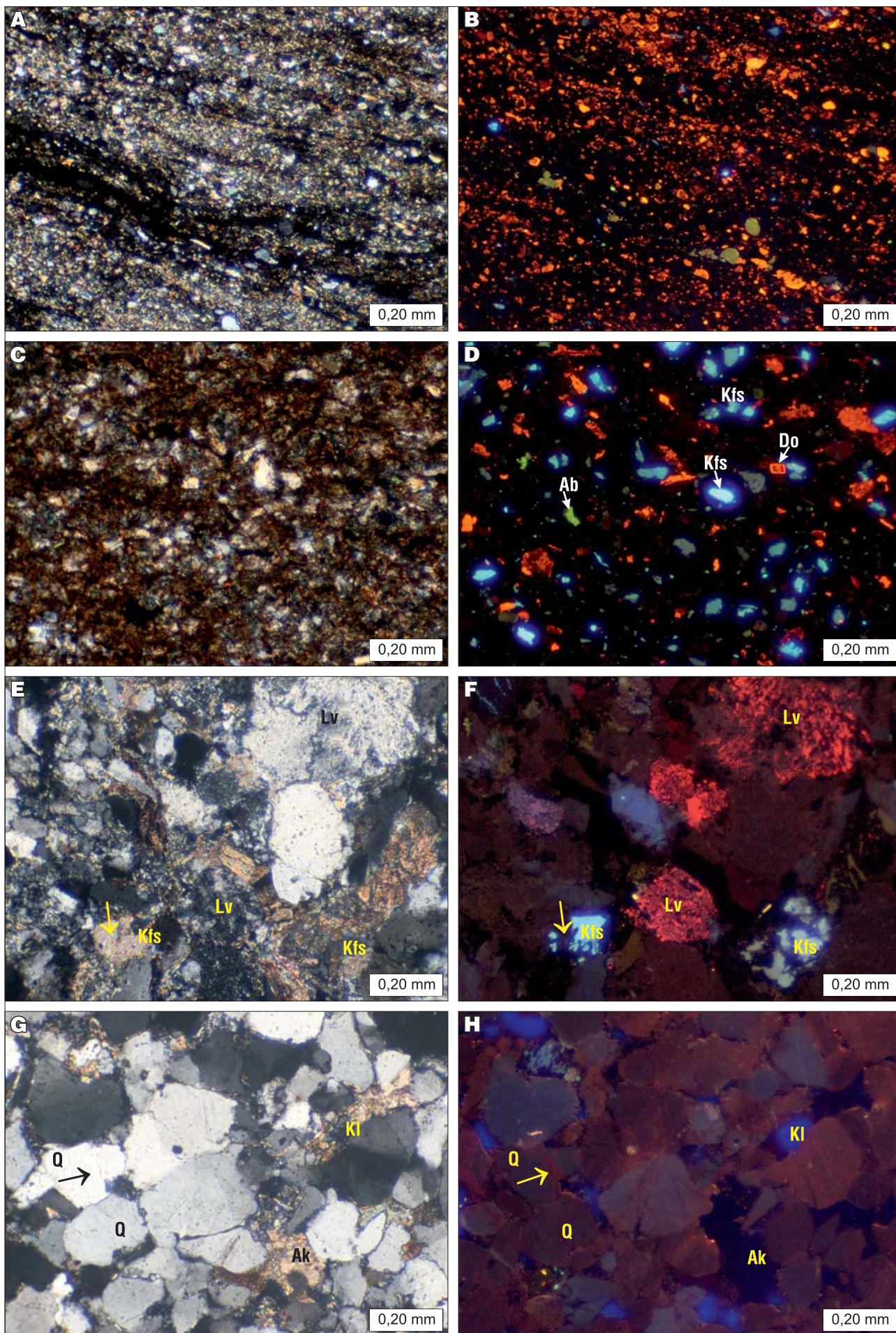
Dominującym składnikiem masy ilastej jest illit, towarzyszą mu struktury mieszanopakietowe illit/smektyt, ponadto chloryty i śladowe ilości kaolinitu. W materiale okruchowym przeważa kwarc, obok którego występują skaleni w zmiennych ilościach. Reprezentowane są przez skaleni potasowe i plagioklasy w różnych wzajemnych proporcjach ilościowych. Obecne w skałach cementy to przeważający ilościowo kalcyt oraz dolomit, Fe-dolomit, ankeryt, piryty, fosforany, anhydryt, sfaleryt i celestyn. W mikroskopach optycznym oraz elektronowym obserwowano obecność rozproszonej materii organicznej i skupionej w mikrolaminach.

Na standardowym obrazie z mikroskopu polaryzacyjnego jest widoczna masa ilasta z większym lub mniejszym udziałem materiału pylastego, trudnego do jednoznacznej identyfikacji. Natomiast na obrazach CL z łatwością odróżniane są ziarna kwarcu, skaleni potasowych, plagioklazów (z wyjątkiem zalbityzowanych skaleni), apatyty (ryc. 1 A–D) oraz bardzo drobne skupienia kalcytu, dolomitu, ankerytu, kaolinitu, fosforanów.

Fakt zaobserwowania znacznie większego udziału plagioklazów, uzyskanego metodą XRD, niż to wynika z opisu mikroskopowego i obserwacji w CL, należy tłumaczyć dużym udziałem zalbityzowanych skaleni, które nie wyróżniają się na obrazach CL.

Skały o wyraźnie podwyższonej zawartości TOC i zaliczone do takich o wysokiej macierzystości nie wykazują

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; magdalena.sikorska-jaworowska@pgi.gov.pl, marta.kuberska@pgi.gov.pl, aleksandra.kozłowska@pgi.gov.pl.



Ryc. 1. **A** – fragment iłowca pylastego wapienistego o teksturze kierunkowej, nikole skrzyżowane, otwór Kościerzyna IG 1, głęb. 4304,9 m; **B** – ten sam obiekt co na ryc. A – obraz CL, widoczne skalenie potasowe wykazujące niebieską luminescencję, apatyt o luminescencji żółtozielonej oraz węglany o luminescencji w barwach pomarańczowych i czerwonych; **C** – fragment iłowca pylastego, materiał pylasty rozproszony w masie ilastej, nikole skrzyżowane, otwór Busówno IG 1, głęb. 2917,7 m; **D** – ten sam obiekt co na ryc. C – obraz CL, widoczne skalenie potasowe (Kfs) wykazujące luminescencję w barwach niebieskich, albit (Ab) o luminescencji zielonej oraz węglany wykazujące luminescencję w barwach pomarańczowoczerwonych i ciemno czerwonych, widoczny romboedr dolomitu (Do); **E** – fragment arenitu sublitycznego/subarkozowego, widoczne ziarna skaleni potasowych (Kfs), okruchy skał wulkanicznych (Lv) i ankeryt (strzałka), nikole skrzyżowane, otwór Marcinki IG 1, głęb. 4229,0 m; **F** – ten sam obiekt co na ryc. E – obraz CL, ziarna skaleni potasowych (Kfs) wykazujące luminescencję w barwach niebieskich, okruchy skał wulkanicznych (Lv) świecące w barwach czerwonych i ankeryt (strzałka), nie wykazujący luminescencji; **G** – fragment arenitu kwarcowego, widoczne ziarna kwarcu (Q) oraz cementy: kwarcowy (strzałka), ankerytowy (Ak) i kaolinitowy (Kl), nikole skrzyżowane, otwór Paproć 29, głęb. 3276,6 m; **H** – ten sam obiekt co na ryc. G – obraz CL, ziarna kwarcu (Q), cement kwarcowy (strzałka) wykazuje luminescencję ciemnobrązową, ankeryt (Ak) nie świeci, kaolinit (Kl) ma ciemnoniebieską luminescencję

Fig. 1. **A** – calcareous silty claystone with directional structure, crossed nicols, Kościerzyna IG 1 borehole, depth 4304.9 m; **B** – the same object as in Fig. A – CL image, K-feldspars showing blue luminescence, apatite with yellow-green luminescence and carbonates with orange and red luminescence are visible; **C** – silty claystone, silty material dispersed in the clayey mass, crossed nicols, Busówno IG 1 borehole, depth 2917.7 m; **D** – the same object as in Fig. C – CL image, K-feldspars (Kfs) with blue luminescence, albit showing green luminescence and carbonates with orange-red and dark red luminescence, dolomite rhombohedron is visible (Do); **E** – sublithic/subarkosic arenite; K-feldspar grains (Kfs), fragments of volcanic rocks (Lv) and ankerite (arrow) are visible, crossed nicols, Marcinki IG 1 borehole, depth 4229.0 m; **F** – the same object as in Fig. E – CL image, potassium feldspars (Kfs) showing blue luminescence, volcanic rock fragments (Lv) with red luminescence and non-luminescent ankerite (arrow); **G** – quartz arenite, quartz grains (Q) and various cements: quartz (arrow), ankerite (Ak) and kaolinite (Kl), crossed nicols, Paproć 29 borehole, depth 3276.6 m; **H** – the same object as in Fig. G – CL image, quartz grains (Q), quartz cement (arrow) showing brown luminescence, non-luminescent ankerite (Ak) and kaolinite (Kl) with dark blue luminescence

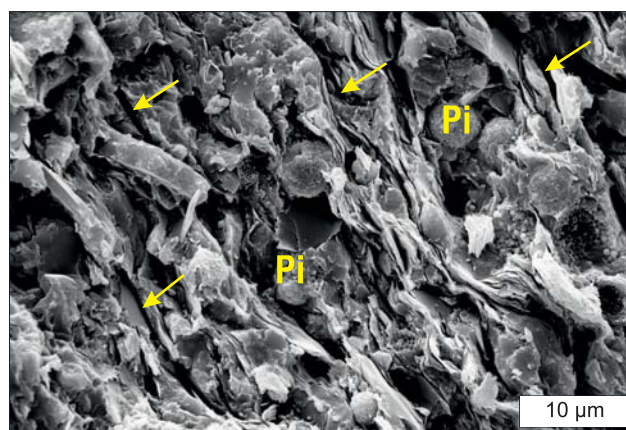
←

odrębnych cech petrograficznych, poza widocznymi lamami i skupieniami materii organicznej. W obserwacjach mikroskopowych ciemne mikrolaminy bogate w organiczkę częściej obserwowano w łupkach z obszaru podlasko-lubelskiego niż bałtyckiego.

Wartości parametru kruchości (zawartość procentowa kwarcu i skaleni pomierzona metodą XRD) na obu badanych obszarach są zbliżone. Średnie wielkości dla poszczególnych profili wiertniczych oscylują pomiędzy 26,0% (Krowie Bagno IG 1) a 34,0% (Kościerzyna IG 1), jedynie w rejonie Narola są wyraźnie wyższe, szczególnie w otworze Narol PIG 2, gdzie wskaźnik ten wynosi 39,2%. W mikroskopie optycznym nie można wykonać analogicznych pomiarów ilościowych, ale należy przytoczyć prowadzone wcześniej szczegółowe badania obecności kwarcu w łupkach kambry górno i tremadoku w profilach Narol IG 1 i PIG 2 (Sikorska-Jaworowska, 2015, 2016). Obserwacje katodoluminescencji w skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM-CL) ujawniły obecność znacznej ilości autigenicznego kwarcu w postaci narostów regeneracyjnych na detrytycznym kwarcu oraz w formie agregatowych skupień. W przypadku skał z otworów Narol IG 1 i Narol PIG 2 na dużą zawartość kwarcu wykazaną podczas analizy XRD składają się ziarna detrytyczne i kwarc pochodzenia diagenetycznego. Obecność cementu kwarcowego to bardzo istotny czynnik wpływający na większą kruchość, a tym samym lepszą podatność na technologiczny proces hydraulicznego kruszenia skał.

Dzięki obserwacjom katodoluminescencyjnym można było ocenić udział i formę występowania węglanów (rozproszone ziarna, mikrożyłki), wpływających także na przebieg procesu szczelinowania.

Odwrotne, negatywne oddziaływanie ma obecność minerałów ilastych w łupkach. Ich zawartość jest dość wysoka: w rejonie bałtyckim średni udział minerałów ilastych w poszczególnych profilach waha się od 48,7% (Gdańsk IG 1) do 57,0% (Darżlubie IG 1), w rejonie pod-

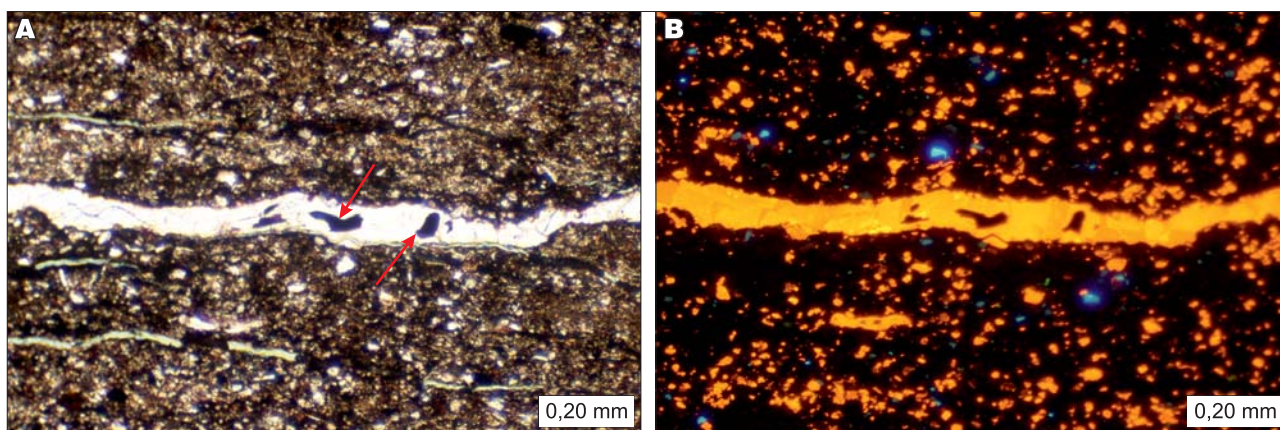


Ryc. 2. Widoczne skupienia pirytu framboidalnego (Pi) oraz porowatość między blaszkami minerałów ilastych – mikropory kanałowe (strzałki), obraz SEM, otwór Darżlubie IG 1, głęb. 3016,5 m

Fig. 2. Concentrations of framboidal pyrite (Pi), note porosity between clay mineral flakes – channel micropores (arrows), SEM image, Darżlubie IG 1 borehole, depth 3016.5 m

lasko-lubelskim od 47,4% (Narol PIG 2) do 54,3% (Busówno IG 1). Dodatkowo należy brać pod uwagę udział fazy pęczniejącej (smektytu) w minerałach mieszanopakietyowych illit/smektyt (I/S). W analizowanych próbkach udział smektytu w strukturach I/S nie przekracza 15%, najczęściej jest poniżej 10%. W masie ilastej występują liczne mikropory, często mające postać długich „mikrokanałów” (ryc. 2).

Występowanie w łupkach licznych spękań, a w szczególności tych nie wypełnionych żadnym cementem (otwartych), jest także ważnym elementem mającym wpływ na kruszenie skał, a dodatkowo są to potencjalne drogi migracji węglowodorów. Świadczy o tym żyłka kalcytowa z zamkniętymi w niej bituminami (ryc. 3). Równoległe do niej bieżą otwarte mikrospeknięcia wypełnione obecnie



Ryc. 3. Fragment iłowca pylastego z żyłką węglanową zawierającą bituminy (strzałki). **A** – widoczne równoległe otwarte mikrospęknięcia wypełnione bładoniebieską żywicą, bez analizatora, otwór Olsztyn IG 2, głęb. 2310,2 m; **B** – ten sam obiekt co na ryc. **A** – obraz CL, kalcyt o żółtopomarańczowej barwie CL tworzący żyłkę i rozproszone drobne skupienia w skale

Fig. 3. Silty claystone with carbonate vein containing bitumen (arrows). **A** – open microfractures (filled with bluish resin) parallel to the lamination, without analyser, Olsztyn IG 2 borehole, depth 2310.2 m; **B** – the same object as in Fig. **A** – CL image, calcite showing yellow-orange luminescence forms vein and dispersed “grains” in the clayey mass



Ryc. 4. Fragment iłowca z przecinającymi się otwartymi mikrospęknięciami (niebieski kolor żywicy), bez analizatora, Narol IG 1, głęb. 3250,2 m

Fig. 4. Claystone with crosscutting open microfractures (blue resin), without analyser, Narol IG 1 borehole, depth 3250.2 m

niebiesko zabarwioną żywicą (wprowadzoną do próbki przed wykonaniem szlif). Obserwowano je w łupkach z rejonu bałtyckiego, a we wcześniejszych badaniach Sikorska-Jaworowska (2016) stwierdziła obecność równoległych i skośnych otwartych spękań w łupkach tremadockich w rejonie Narola (ryc. 4).

Analiza statystyczna wyników analizy porowatości wskazuje na większą porowatość efektywną i całkowitą w łupkach z rejonu bałtyckiego niż z rejonu podlasko-lubelskiego. Średnie wartości tych parametrów dla całych obszarów wynoszą w rejonie bałtyckim odpowiednio 6,6 i 10,4%, a w rejonie podlasko-lubelskim 5,0 i 9,1%. Być może wpływ na to zróżnicowanie ma częściej obserwowana w mikroskopie obecność otwartych spękań w próbkach skał z obszaru bałtyckiego.

Mikroskopowe badania skał niższego paleozoiku z rejonów podlasko-lubelskiego oraz bałtyckiego dowodzą ich dużego podobieństwa zarówno pod względem składu mineralogicznego, jak i podatności na proces hydraulicznego kruszenia.

PODŁOŻE MONOKLINY PRZEDSUDECKIEJ

Badane skały powstałe w basenie karbońskim SW Polski (podłoże monokliny przedsudeckiej) to przede wszystkim piaskowce. Reprezentowane są one głównie przez waki (sublityczne, subarkozowe, rzadko kwarcowe), w mniejszej mierze przez arenity (lityczne i sublityczne, subarkozowe – ryc. 1E–F, sporadycznie kwarcowe – ryc. 1G–H). Inne typy skał – pyłowce i iłowce, mają znikomy udział. Wyniki badań rentgenowskich składu mineralnego skał wskazują na częstsze występowanie iłowców (>50% minerałów ilastych), ale należy wziąć pod uwagę fakt dużego udziału w piaskowcach okruchów skalnych zawierających pelit ilasty oraz skaleni ulegających częściowej argilityzacji.

Kluczowym zagadnieniem jest porowatość badanych piaskowców. Obserwacje płytek cienkich pod mikroskopem polaryzacyjnym wskazują na zupełny brak porowatości. Przestrzenie międzyziarnowe są szczelnie wypełnione przez ilaste matriks i protomatriks. Nie zaobserwowano także mikrospękań. Mikroporowatość jest widoczna dopiero pod mikroskopem elektronowym. Mikropory to efekt częściowego rozpuszczenia skaleni oraz obecności pustych przestrzeni pomiędzy pakietami blaszek kaolinitu, łuszczyku lub chlorytu. Autigeniczny włóknisty illit nie wypełnia całkowicie przestrzeni porowych i też zachowuje mikroporowatość w skale.

Badane piaskowce należy jednak zaliczyć do skał bardzo słabo porowatych i nieprzepuszczalnych. Jednoznacznie potwierdzają to badania porozymetryczne. Średnie wartości porowatości efektywnej i całkowitej dla profili Marcinki IG 1 i Września IG 1 (dla pozostałych dysponowano jedynie kilkoma pomiarami) wynoszą odpowiednio: Marcinki IG 1 – 1,15 i 3,17% oraz Września IG 1 – 0,97 i 3,50%. Analizy wykazały brak przepuszczalności w piaskowcach (maks. 0,03 mD) (Opracowanie..., 2015). Jest to związane z dużą ilością matriksu ilastego, który szczelnie wypełnia przestrzenie porowe piaskowców. Zawartość minerałów ilastych w tych skałach (wg analiz XRD) wynosi zwykle 30–40%, ale niekiedy przekracza 50%.

Wyniki analogicznych badań porozymetrycznych karbońskich skał drobnziarnistych (iłowce/pyłowce) wskazują na bardzo niskie parametry porowatości i przepuszczalności. Średnie wartości porowatości dla wszystkich próbek skał iłowcowo-pyłowcowych wynoszą: porowatość efektywna – 1,60% i całkowita – 5,30%. Są to wyraźnie niższe wielkości od analogicznych dla rejonu bałtyckiego i podlasko-lubelskiego.

Średnia zawartość minerałów ilastych w łupkach karbońskich z poszczególnych profili zmienia się od 58,7% (Siciny IG 1) do 68,1% (Więcki IG 1). Są to wartości zdecydowanie wyższe niż w rejonach bałtyckim i podlasko-lubelskim. Jednocześnie łupki z basenu karbońskiego zawierają znacznie mniej węglanów niż łupki dolno-paleozoiczne. Parametr kruchości dla łupków karbońskich waha się od 23,0% (Paproc 29) do 33,7% (Marcinki IG 1) i jest bardzo zbliżony do wartości uzyskanych dla łupków ordowicko-sylurskich.

PODSUMOWANIE

W artykule omówiono wyniki badań petrograficznych skał kambru, ordowiku i syluru występujących wzdłuż zachodniego skłonu kratonu wschodnioeuropejskiego oraz karbońskich podłoża monokliny przedsudeckiej. Stanowią one ważny element kompleksowej analizy skał pod kątem rozpoznania niekonwencjonalnych złóż węglowodorów. Szczegółowa charakterystyka petrologiczna badanych próbek skał została przedstawiona w opracowaniu archiwalnym projektu „Rozpoznanie ...” (2016).

Wstępne wyniki badań petrograficznych dotyczących skał karbonu dolnego w basenie karbońskim SW Polski zaprezentowano w publikacji Kozłowskiej i Kuberskiej (2015).

Mikroskopowe badania łupków niższego paleozoiku z obszaru bałtyckiego i podlasko-lubelskiego dowodzą ich dużego podobieństwa zarówno pod względem składu mineralogicznego, jak i przypuszczalnej podatności na proces hydraulicznego kruszenia.

Zawartość minerałów ilastych w łupkach jest dość wysoka, ale udział smektytu w minerałach mieszanopakietowych (I/S) nie przekracza 15%.

Karbońskie kompleksy łupkowe posiadają wyższą średnią zawartość minerałów ilastych niż w rejonie bałtycko-podlasko-lubelskim. Parametr kruchości jest bardzo zbliżony do wartości uzyskanych dla łupków ordowicko-sylurskich.

Karbońskie piaskowce reprezentują głównie waki sublityczne i subarkozowe. Skały te charakteryzują się słabą porowatością i w większości są nieprzepuszczalne.

Autorki dziękują: prof. dr hab. Annie Maliszewskiej i dr. Grzegorzowi Leśniakowi za recenzję artykułu, Leszkowi Giro (PIG-PIB) za wykonanie analiz i zdjęć w mikroskopie elektronowym, pracownikom Instytutu Nafty i Gazu – PIB za przeprowadzenie analiz petrofizycznych i rentgenowskich. Badania, których wyniki przedstawiono w artykule, zostały wykonane w ramach projektu „Rozpoznanie stref perspektywicznych dla występowania niekonwencjonalnych złóż węglowodorów w Polsce, etap I” i były finansowane przez Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej (umowa dotacji nr 784/2013/Wn-07/FG-SM-DN z dn. 5.11.2013 r.).

LITERATURA

- KOZŁOWSKA A. & KUBERSKA M. 2015 – Piaskowce dolnego karbonu strefy wielkopolsko-śląskiej jako utwory perspektywiczne pod względem poszukiwań złóż gazu zamkniętego (badania wstępne). *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 464: 49–60.
- OPRACOWANIE informacji geologicznej zawierającej charakterystykę zmienności składu mineralnego, geochemicznego i petrofizycznych właściwości skał na podstawie badań laboratoryjnych oraz oceny ich macierzystości przeprowadzonej na podstawie analizy pomiarów geofizyki otworowej i ich korelacji z wynikami analiz przeprowadzonej w rdzeniu wiertniczym w oparciu o analizy z 15 otworów wiertniczych. INiG-PIB, 2015. [W:] T. Podhalańska (red.), *Rozpoznanie stref perspektywicznych dla występowania złóż węglowodorów niekonwencjonalnych w Polsce, etap I*, 2016. *Nar. Arch. Geol. PIG-PIB*, Warszawa.
- ROZPOZNANIE stref perspektywicznych dla występowania złóż węglowodorów niekonwencjonalnych w Polsce, etap I, 2016. Podhalańska T. (red.). *Nar. Arch. Geol. PIG-PIB*, Warszawa.
- SIKORSKA-JAWOROWSKA M. 2015 – Petrologia utworów furongu. *Prof. Głęb. Otw. Wiertn. Narol IGI PiG 2*, 143: 105–109.
- SIKORSKA-JAWOROWSKA M. 2016 – Osady kambru górnego i tremadoku w rejonie Narola (S Lubelszczyzna) – źródło i nośnik gazu łupkowego? *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 467: w druku.