

Ocena jakościowo-ilościowa gazów pochodzących z degazacji rdzeni skalnych na tle właściwości petrofizycznych skał kompleksu miedzionośnego południowej części monokliny przedsudeckiej

Qualitative and quantitative evaluation of gases originating from the rock cores degassing against the petrophysical properties of the rocks from copper-bearing complex of the southern part of the Fore-Sudetic Monocline

Małgorzata Kania, Marek Janiga

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Przedmiotem badań były próbki rdzeni pochodzące z utworów miedzionośnych, w celu określenia zależności różnego typu parametrów geochemicznych z wykształceniem litologicznym badanych skał w nawiązaniu do badań petrofizycznych. W związku z tym przeanalizowany został zarówno skład molekularny gazów pod kątem obecności azotu nadmiarowego, helu, wodoru, związków siarki i węglowodorów, jak również dokładna ilość wydzielonego gazu. Badania przeprowadzono na próbkach gazu desorbowanego oraz na próbkach gazu resztkowego i na tej podstawie zostały określone pewne prawidłowości zmian jakościowo-ilościowych, co w konsekwencji pozwala na przewidywanie lokalizacji miejsc o zwiększonej akumulacji dla poszczególnych gazów. Dodatkowo analizie statystycznej poddano wybrane właściwości petrofizyczne skał, z których pozyskano gaz. Na podstawie uzyskanych wyników badań można zaklasyfikować skały takie, jak piaskowiec i dolomit wapnisty, jako typy litologiczne o wysokim potencjale akumulacyjnym dla gazów. Zdecydowanie najwyższa ilość gazu resztkowego uzyskana została z serii piaskowców. Nieco mniejsze ilości gazu wydzielili się z kolei z próbek dolomitu wapnistego. Jeszcze mniejsze zanotowano dla soli kamiennej, a najniższe dla próbek anhydrytowych. Średnie ilości wydzielonego gazu resztkowego doskonale korelują z właściwościami petrofizycznymi, takimi jak: średnie wartości porowatości całkowitej i otwartej, powierzchnia właściwa oraz przepuszczalność. Na podstawie przeprowadzonej analizy, zaobserwowano duże zróżnicowanie oznaczeń zarówno ilościowo-jakościowych gazów, jak i właściwości petrofizycznych badanych rdzeni piaskowców i dolomitów wapnistych (gdzie mogą być kumulowane duże ilości gazu, co stanowi zasadnicze zagrożenie dla wyrobisk górniczych). Z kolei dostępne wyniki badań dla próbek anhydrytowych oraz soli kamiennej sugerują, że w analizowanym obszarze (pomimo stosunkowo słabych właściwości kolektorskich skał) pojawiają się jednak warunki do wystąpienia lokalnych pułapek gazu w strefach o podwyższonej porowatości.

Słowa kluczowe: degazacja, gaz desorbowany, gaz resztkowy, chromatografia gazowa, skład molekularny, właściwości petrofizyczne, seria miedzionośna, LGOM.

ABSTRACT: The subject of the study were core samples originating from copper-bearing deposits, in order to determine the correlation of different types of geochemical parameters with the lithological variation of the studied rocks in reference to petrophysical investigations. The molecular gas composition for the presence of excess nitrogen, helium, hydrogen, sulfur compounds, and hydrocarbons, as well as the exact amount of evolved gas, were examined. The tests were performed on samples of desorbed gas and on residual gas samples, and on this basis certain regularities of qualitative and quantitative changes were determined, which in turn allows to forecast the location of places with increased accumulation of individual gases. Additionally, the petrophysical properties of the rocks from which the gas was obtained, were subjected to statistical analysis. Based on the obtained research results, rocks such as sandstone and calcareous dolomite can be classified as lithological types with high accumulation capacities for gases. It is clear that the highest amount of residual gas was obtained from a series of sandstones, slightly smaller amounts of gas released from the samples of calcareous dolomite; less were noted for rock salt, and the lowest for anhydrite samples. The average amount of separated residual gas perfectly correlates with the petrophysical properties, such as: mean values of total and open porosity, specific surface area, and permeability. On the basis of the analysis, a large diversity of quantitative and qualitative gas composition determinations, and the petrophysical properties

Autor do korespondencji: M. Kania, e-mail: kaniam@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji 25.01.2019 r. Zatwierdzono do druku 13.05.2019 r.

of the studied sandstone and dolomite cores was observed (where large amounts of gas can be accumulated, which is a major threat to mining excavations). In contrast, the available results for anhydrite and rock salt samples suggest that in the analysed area (despite the relatively poor collector properties of rocks), there are conditions for local gas traps in zones with increased porosity.

Key words: degassing, desorbed gas, residual gas, gas chromatography, molecular composition, petrophysical properties, copper-bearing series, Legnica-Głogów Copper District (LGOM).

Wstęp

Występowanie gazu ziemnego i ropy naftowej w utworach permu południowej części monokliny przedsudeckiej w rejonie Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego (LGOM), stwierdzono już w latach 1962–1980, podczas prowadzenia wierceń badawczych z powierzchni (Downorowicz, 2007). Natomiast na początkowym etapie dokumentowania złóż rud miedzi, prowadzonego w obszarze między Lubinem i Sieroszowicami (Kłapciński i Peryt, 2007) zaobserwowano objawy zgazowania płuczki w kilkunastu wierconych wówczas otworach, które miały miejsce głównie w seriach: węglanowej (Ca1) i anhydrytowej (A1). Jednak faktycznie intensywne badania w obrębie zagospodarowanych złóż LGOM, pod kątem zarówno obecności gazów, jak i własności kolektorskich skał okolozłożowych, rozpoczęto dopiero po zdarzeniu wyrzutu gazów i skał w chodniku T-169a na poziomie 1200 m, mającego miejsce 6 września 2009 r. w ZG Rudna (Zawisza et al., 2010).

Celem podjętych badań było określenie zależności różnego typu parametrów geochemicznych z wykształceniem litologicznym badanych skał w nawiązaniu do badań petrofizycznych. Dla formacji miedzionośnych określenie tego typu prawidłowości oraz poznanie gazowych produktów generacji poszczególnych ich składników z różnych typów skał (m.in. piaskowca, dolomitu wapnistego, anhydrytu i soli kamiennej) pozwoli na przewidywanie kierunków ekshalacji gazowych, a w przyszłości może przyczynić się do utrzymania bezpieczeństwa w kopalniach (Kania i Janiga, 2018).

Metodyka badań

Degazacja rdzeni skalnych

Próbki rdzeni skalnych pobrane w kopalni miedzi (głównie z otworów), zostały umieszczone w szczelnych pojemnikach, tzw. kanistrach desorpcyjnych. Próbki dla oceny gazu desorbowanego, pobierano strzykawką wprost z pojemnika znad rdzenia i podawano do analizy chromatograficznej. Po wykonaniu analiz chromatograficznych z tych samych pojemników pobierano średnio po około 20 g próbki, którą rozdrabniano w zamkniętym cylindrze. Po zakończonym procesie degazacji pobierano gaz, nazywany gazem resztkowym, który nie wydzielił się samoistnie z próbki. Ilość gazu uzyskanego

w wyniku rozdrobnienia skały wynosiła około 45 cm³ i po uwzględnieniu wielkości próbki i objętości pojemnika przeliczono każdy ze składników w stosunku do 1kg próbki skalnej (μl/kg skały) (Janiga i Kania, 2014).

Gaz desorbowany reprezentuje tę część gazu, która znajduje się w przestrzeni porowej i która może swobodnie migrować. Gaz resztkowy reprezentuje natomiast tę część gazu, która jest uwolniona ze skały po rozdrobnieniu próbki w przestrzeni zamkniętej (Diamond i Schatzel, 1998).

Analiza składu molekularnego gazu

Próbki gazowe poddano analizie chromatograficznej, określając zawartość następujących składników: O₂, N₂, CO₂, CO, C₁, C₂, C₃, i-C₄, n-C₄, neo-C₅, i-C₅, n-C₅ oraz sum węglowodorów C₆, C₇, C₈, C₉ i C₁₀. Do analizy GC zastosowano dwukanałowy, zaworowy chromatograf gazowy AGILENT 7890A oraz układ kolumn i detektorów (Kania i Janiga, 2011):

- detektor TCD i FID (FRONT) – kolumny kapilarne: HP-PLOT/Q, długość 15 m, śred. wewn. 0,53 mm; HP-PLOT/Q, długość 30 m, śred. wewn. 0,53 mm; HP-MOLESIEVE 5A, długość 30 m, śred. wewn. 0,53 mm,
- detektor FID (BACK) – kolumna kapilarna HP-PONA, długość 50 m, śred. wewn. 0,200 mm.

W trakcie analizy jako gazu nośnego użyto argonu z gradientem przepływu od 3 ml/min do 6 ml/min. Zastosowano program temperaturowy kolumny od 35°C do 260°C, temperaturę katalizatora niklowego 375°C, temperaturę detektorów FID 300°C oraz temperaturę dozownika i detektora TCD 200°C.

Do oznaczenia zawartości H₂ i He zastosowano chromatograf gazowy AGILENT 7890A oraz detektor ciepło-przewodnościowy (TCD – *thermal conductivity detector*) i kolumnę pakowaną Molecular Sieve 5A Ultimet 9FT × 1/8IN × 2,00 mm. Gazem nośnym podczas oceny zawartości H₂ i He był argon o stałym przepływie 3 ml/min. Zastosowano gradient temperaturowy kolumny od 30°C do 240°C, temperaturę dozownika i detektora TCD 200°C.

Natomiast do oznaczenia zawartości H₂S oraz innych związków siarki (merkaptan metylowy, merkaptan etylowy, siarczki dimetylowy, merkaptan i-propylowy, merkaptan n-propylowy, merkaptan i-butyłowy, merkaptan n-butyłowy) zastosowano chromatograf gazowy AGILENT 7890A oraz detektor płomieniowo-fotometryczny (FPD – *flame photometric detector*) i kolumnę kapilarną DB-1 długość 60 m, średn.

wewn. 0,32 mm, gdzie gazem nośnym był argon o stałym przepływie 3 ml/min. Zastosowano gradient temperatury kolumny od 30°C do 240°C, temperaturę dozownika 200°C oraz temperaturę detektora FPD 250°C.

Badania petrofizyczne

Badanie i parametryzacja przestrzeni porowej została wykonana przy pomocy porozymetrii rtęciowej (porozymetr AutoPore IV 9500, Micromeritics) przy ciśnieniach do 30 tys. psi, poprzez pomiar krzywych ciśnień kapilarnych. Natomiast pomiary gęstości wykonane zostały przy pomocy piknometru helowego AccuPyc 1340 firmy Micromeritics. Gęstość szkieletową uzyskaną z piknometru helowego

wykorzystuje się do korekty porowatości otwartej z pomiaru porozymetrycznego. Pomiary gęstości i porowatości zostały wykonane na tej samej próbce. Z kolei oznaczenie współczynnika przepuszczalności efektywnej wykonano przy użyciu azotu, jako gazu roboczego. Pomiar polega na doprowadzeniu do ustalonego, laminarnego przepływu gazu przez badaną próbkę i wyliczeniu współczynnika przepuszczalności przy pomocy równania Darcy'ego. Techniczne wykonanie pomiaru zależy od przyjętej geometrii pomiaru i rodzaju użytej próbki. Pomiary współczynnika przepuszczalności zostały wykonane dla tzw. geometrii liniowej, tj. gaz płynie przez próbkę o stałym przekroju i długości. Do tego typu badań stosuje się wycięte walce o średnicy 1 cala i długości 3–4 cm.

Tabela 1. Analiza statystyczna wyników badań składu gazu desorbowanego i resztkowego dla różnych typów skał

Table 1. Statistical analysis of the desorbed and residual gas composition research results for various types of rocks

Oznaczany składnik gazu	Σ ilość gazu	C1	Σ CH	Σ zw. S	CO ₂	N ₂ nadm.	H ₂	He
Dolomit wapnisty – gaz desorbowany								
Max [μl/kg skały]	313 815,2	381,8	569,0	0,1	11 981,8	310 844,0	2 874,3	20,9
Min [μl/kg skały]	37,3	0,6	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Średnia [μl/kg skały]	16 089,9	19,9	61,1	0,0	525,6	15 195,4	300,3	0,2
Mediana [μl/kg skały]	627,0	9,2	27,7	0,0	174,2	0,0	113,0	0,0
Rozstęp [μl/kg skały]	313 777,9	381,2	567,2	0,1	11 981,8	310 844,0	2 874,3	20,9
Ilość próbek	127	127	127	127	127	127	127	127
Dolomit wapnisty – gaz resztkowy								
Max [μl/kg skały]	126 483,2	4 418,7	10 509,9	0,5	22 060,4	106 474,0	1 377,2	141,7
Min [μl/kg skały]	490,3	41,7	82,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Średnia [μl/kg skały]	21 659,7	1 299,2	2 568,7	0,0	8 555,2	10 303,3	224,5	1,1
Mediana [μl/kg skały]	16 013,7	1 167,9	2 212,8	0,0	7 531,8	1 216,9	166,6	0,0
Rozstęp [μl/kg skały]	125 992,9	4 377,0	10 427,8	0,5	22 060,4	106 474,0	1 377,2	141,7
Ilość próbek	127	127	127	127	127	127	127	127
Anhydryt – gaz desorbowany								
Max [μl/kg skały]	84 128,8	2 656,5	11 535,6	0,1	4 651,1	67 918,0	1 243,4	0,0
Min [μl/kg skały]	2,4	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0
Średnia [μl/kg skały]	2 060,8	58,0	163,5	0,0	500,0	1 288,2	102,7	0,0
Mediana [μl/kg skały]	399,8	10,1	26,2	0,0	197,9	0,0	44,8	0,0
Rozstęp [μl/kg skały]	84 126,4	2 656,5	11 535,6	0,1	4 650,3	67 918,0	1 243,4	0,0
Ilość próbek	124	124	124	124	124	124	124	124
Anhydryt – gaz resztkowy								
Max [μl/kg skały]	52 370,7	5 747,1	17 161,8	903,4	20 971,8	33 892,9	1 312,9	0,0
Min [μl/kg skały]	48,9	23,2	34,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Średnia [μl/kg skały]	4 615,4	547,1	1 349,8	7,6	1 513,2	1 643,3	96,9	0,0
Mediana [μl/kg skały]	1 197,2	345,2	636,2	0,0	0,0	0,0	73,2	0,0
Rozstęp [μl/kg skały]	52 321,8	5 723,9	17 127,8	903,4	20 971,8	33 892,9	1 312,9	0,0
Ilość próbek	124	124	124	124	124	124	124	124

cd. Tabela 1/ ect. Table 1

Oznaczany składnik gazu	Σ ilość gazu	C1	Σ CH	Σ zw. S	CO ₂	N ₂ nadm.	H ₂	He
Sól kamienna – gaz desorbowany								
Max [μl/kg skały]	1 567 031,2	3 493,3	6 125,1	12,2	5 281,1	1 565 945,7	56 856,4	107,5
Min [μl/kg skały]	12,1	0,9	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Średnia [μl/kg skały]	62 597,2	62,0	200,3	0,2	379,2	61 062,9	949,5	1,0
Mediana [μl/kg skały]	470,0	7,9	26,9	0,0	149,0	0,0	0,0	0,0
Rozstęp [μl/kg skały]	1 567 019,1	3 492,4	6 124,1	12,2	5 281,1	1 565 945,7	56 856,4	107,5
Ilość próbek	108	108	108	108	108	108	108	108
Sól kamienna – gaz resztkowy								
Max [μl/kg skały]	274 470,3	515,5	4 564,5	6,0	7 098,8	274 205,1	913,1	184,4
Min [μl/kg skały]	7,8	5,8	5,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Średnia [μl/kg skały]	13 539,0	51,2	253,5	0,3	921,9	12 293,1	60,8	9,5
Mediana [μl/kg skały]	3 331,4	24,8	58,8	0,0	430,2	1 827,0	0,0	0,0
Rozstęp [μl/kg skały]	274 462,5	509,7	4 558,6	6,0	7 098,8	274 205,1	913,1	184,4
Ilość próbek	108	108	108	108	108	108	108	108
Piaskowiec – gaz desorbowany								
Max [μl/kg skały]	59 759,2	218,7	234,2	0,8	2 068,9	58 470,1	1 265,4	0,0
Min [μl/kg skały]	10,3	1,2	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Średnia [μl/kg skały]	7 033,4	11,4	21,1	0,0	260,9	6 685,1	59,7	0,0
Mediana [μl/kg skały]	489,2	4,8	9,9	0,0	40,2	0,0	0,0	0,0
Rozstęp [μl/kg skały]	59 748,9	217,5	233,0	0,8	2 068,9	58 470,1	1 265,4	0,0
Ilość próbek	47	47	47	47	47	47	47	47
Piaskowiec – gaz resztkowy								
Max [μl/kg skały]	789 909,4	1 324,4	3 749,0	0,6	17 731,1	783 276,1	11 044,2	133,6
Min [μl/kg skały]	2 317,7	18,4	24,5	0,0	1 598,0	0,0	0,0	0,0
Średnia [μl/kg skały]	160 828,5	184,9	407,8	0,0	5 443,7	153 568,2	1 380,7	2,8
Mediana [μl/kg skały]	112 363,0	127,1	163,6	0,0	4 786,3	101 368,1	405,6	0,0
Rozstęp [μl/kg skały]	787 591,7	1 306,0	3 724,5	0,6	16 133,1	783 276,1	11 044,2	133,6
Ilość próbek	47	47	47	47	47	47	47	47

Część doświadczalna

Charakterystyka próbek i wyniki badań

Próbki skał, pochodzące z utworów miedzionośnych z rejonu Sieroszowic o zróżnicowanym wykształceniu litolofacjalnym, reprezentujące m.in. anhydryt, dolomit wapnisty, sól kamienną oraz piaskowiec poddano szczegółowym badaniom petrofizycznym i chromatograficznym. Dla tych samych próbek dokonano oceny składu molekularnego i ilości wydzielonych gazów (zarówno desorbowanych i resztkowych) dla licznej grupy próbek, reprezentujących różne typy skał (o różnych właściwościach petrofizycznych).

W celu lepszego usystematyzowania informacji o miejscach kumulacji gazowych, a tym samym do skorelowania różnych parametrów między sobą, z bardzo licznej grupy próbek

wytypowano 47 próbek piaskowca, 108 próbek soli kamiennej, 127 próbek dolomitu wapnistego i 124 próbki anhydrytu, dla których przeprowadzono analizę statystyczną wyników badań wydzielonych gazów (tab. 1) i wybranych parametrów petrofizycznych (tab. 2).

Korelacja pomiędzy ilością gazu a wykształceniem litolofacjalnym na tle właściwości petrofizycznych

Poszczególne serie skalne występujące w otoczeniu złóż rud miedzi, tj. piaskowce czerwonego spągowca (P1) obecne w spągu złoża oraz występujące w części stropowej kolejno: seria skał węglanowych wapienia cechsztyńskiego (Ca1), anhydryty dolny i górny (A1d i A1g), a także najstarsza sól kamienna (Na1), mogą stanowić lokalnie odrębne strefy akumulacji gazów (Zawisza et al., 2010). Stąd też w niniejszej pracy

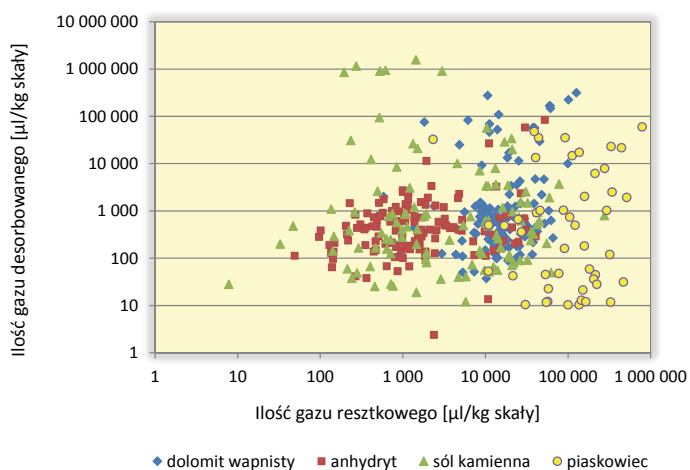
Tabela 2. Analiza statystyczna wyników badań wybranych parametrów petrofizycznych dla różnych typów skał
Table 2. Statistical analysis of selected petrophysical parameters research results for various types of rocks

Oznaczany parametr	Gęstość materiałowa	Porowatość całkowita	Gęstość szkieletowa	Gęstość objętościowa	Porowatość otwarta	Średnia kapilarna	Powierzchnia właściwa	Pory >1 μm	Średnica progowa	Histereza	Przep. x	Przep. z
	[g/cm ³]	[%]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[%]	[μm]	[m ² /g]	[%]	[μm]	[%]	[mD]	[mD]
Dolomit wapniasty												
Max	3,40	17,82	3,41	3,39	15,87	5,88	6,49	100	10,00	92	0,37	29,40
Min	2,78	0,33	2,39	2,26	0,31	0,00	0,00	0	0,02	1	0,00	0,00
Średnia	2,90	2,16	2,83	2,78	2,01	0,25	0,57	46	1,43	62	0,02	0,90
Mediana	2,88	1,14	2,82	2,78	1,05	0,01	0,00	44	0,10	72	0,01	0,01
Rozstęp	0,62	17,49	1,02	1,13	15,56	5,88	6,49	100	9,98	91	0,37	29,39
Ilość próbek	127	127	127	127	127	127	127	127	127	127	127	127
Anhydryt												
Max	3,05	11,91	3,02	2,98	11,39	9,16	1,41	100	6,00	63	0,02	0,08
Min	2,22	0,14	2,20	2,12	0,14	0,00	0,00	0	0,00	3	0,00	0,00
Średnia	2,95	1,03	2,92	2,89	0,99	0,57	0,05	79	0,78	24	0,01	0,01
Mediana	2,97	0,73	2,95	2,93	0,70	0,00	0,00	88	0,09	22	0,01	0,01
Rozstęp	0,83	11,77	0,82	0,86	11,25	9,16	1,41	100	6,00	60	0,02	0,08
Ilość próbek	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124
Sól kamienna												
Max	2,97	5,92	2,97	2,96	5,91	13,21	3,08	100	40,00	66	0,01	3,35
Min	2,16	0,29	1,00	0,00	0,29	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00
Średnia	2,33	2,55	2,29	2,23	2,48	1,32	0,25	79	3,14	20	0,01	0,42
Mediana	2,21	2,45	2,19	2,14	2,45	0,18	0,03	90	0,15	15	0,01	0,00
Rozstęp	0,81	5,63	1,97	2,96	5,62	13,21	3,08	100	40,00	66	0,01	3,35
Ilość próbek	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97
Piaskowiec												
Max	3,12	28,47	3,12	2,67	26,74	2,98	4,68	98	83,00	90	37,94	23,28
Min	2,64	1,70	2,13	1,92	1,14	0,02	0,05	0	0,02	2	0,01	0,01
Średnia	2,70	14,56	2,57	2,24	13,26	0,35	1,72	45	4,82	63	6,39	3,13
Mediana	2,69	13,94	2,61	2,19	12,58	0,19	1,79	46	2,00	70	1,59	0,95
Rozstęp	0,48	26,77	0,99	0,75	25,60	2,96	4,63	98	82,98	88	37,93	23,28
Ilość próbek	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42

Gdzie: Przep. x – przepuszczalność pozioma (x) [mD]; Przep. z – przepuszczalność pionowa (z) [mD].

dokonano szczegółowej oceny ilościowo-jakościowej ich warunków gazowych.

Analizując liczne wyniki badań chromatograficznych (tab. 1, rys. 1) polegające na oznaczeniu składu ilościowo-jakościowego gazów zawartych w rdzeniach wiertniczych łatwo zauważyć fakt, iż zdecydowanie najwyższa średnia ilość gazu resztkowego uzyskana została z piaskowców i wynosiła 160 829 $\mu\text{l}/\text{kg}$ skały. Nieco mniejsze ilości gazu resztkowego wydzielili się z kolei z próbek dolomitu wapnisteo, gdzie ich średnia wartość wyniosła 21 660 $\mu\text{l}/\text{kg}$ skały. Jeszcze mniejsze ilości gazu resztkowego zanotowano dla soli kamiennej – Na1 (13 539 $\mu\text{l}/\text{kg}$ skały), a najniższe dla próbek anhydrytowych (4615 $\mu\text{l}/\text{kg}$ skały). Średnie ilości wydzielonego gazu resztkowego doskonale korelują się z właściwościami petrofizycznymi, takimi jak: średnie wartości porowatości całkowitej (rys. 2) i otwartej (rys. 5), powierzchnia właściwa (rys. 7) oraz przepuszczalność pionowa (rys. 9). Do sporządzenia wykresów i diagramów korelacyjnych wykorzystano wyniki przepuszczalności pionowej (z), a nie poziomej (x) ze względu na zdecydowanie większą liczbę pozytywnych pomiarów petrofizycznych.

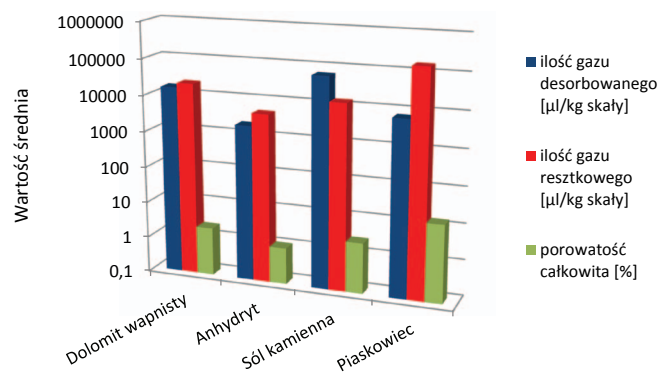


Rys. 1. Zależność sumarycznej ilości gazu desorbowanego od resztkowego dla różnych typów skał

Fig. 1. Dependence of the total amount of desorbed gas from residual gas for various rock types

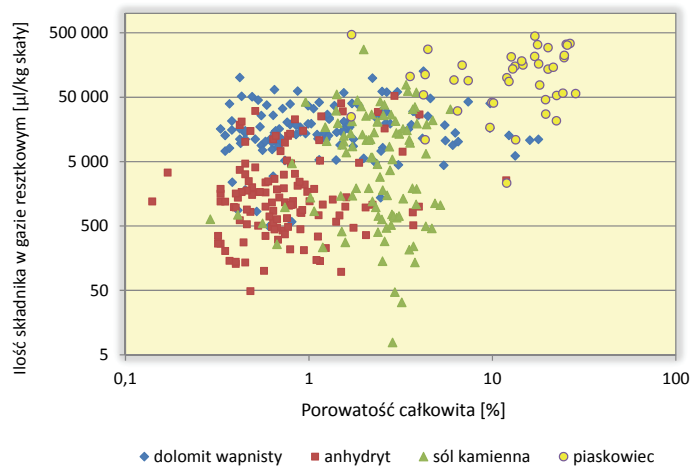
Z kolei próbki soli kamiennej charakteryzują się anomalnie wysokimi ilościami gazu desorbowanego (rys. 2), co wiąże się z dużą zawartością azotu nadmiarowego wydzielonego z otwartej przestrzeni porowej rdzenia (tab. 1). Azot, a tym samym duże ilości gazu desorbowanego w pokładach soli kamiennej można tłumaczyć selektywną adsorpcją gazu podczas migracji na duże odległości. Migracja gazu prawdopodobnie nastąpiła przez pęknięcia i szczeliny z utworów karbonu, czerwonego spągowca i wapienia cechsztyńskiego (Kotarba et al., 2006). Azot może mieć również biogenne pochodzenie (Poszytek et al., 2018).

Próbki pochodzące z serii piaskowcowej (zarówno czerwonego piaskowca, jak i białego) charakteryzują się najwyższą średnią porowatością całkowitą (rys. 2 i 3), o wartości 14,6% (i bardzo dużym rozrzutem wyników w zakresie od 1,7% do 28,5%). W tychże porach zostały również skumulowane i zamknięte największe ilości gazu, zwanym resztkowym (w zakresie od 2318 do 789 909 $\mu\text{l}/\text{kg}$ skały).



Rys. 2. Diagram przedstawiający wartości średnich ilości gazu (desorbowanego i resztkowego) oraz porowatości całkowitej dla rdzeni o różnym wykształceniu litologicznym

Fig. 2. Diagram presenting the average values of the amount of gas (desorbed and residual) and the total porosity for cores of different lithology



Rys. 3. Ilość gazu resztkowego w funkcji porowatości całkowitej dla próbek rdzeniowych o różnym wykształceniu litologicznym

Fig. 3. The residual gas amount as a function of the total porosity for core samples of different lithology

Według licznych doniesień w utworach piaskowcowych czerwonego spągowca, posiadających znaczne rozprzestrzenienie i występujących na przeważającej powierzchni obszaru całej monokliny przedsudeckiej, następuje przepływ lateralny gazów od NE w kierunku SW, to jest w kierunku LGOM. Wysoka porowatość i stosunkowo niska przepuszczalność piaskowców, umożliwiają tworzenie się lokalnych „zamkniętych” pułapek gazu, szczególnie w strefach dyslokacji tektonicznych

i towarzyszących im spękań i szczelin (Zawisza et al., 2010). Ponadto słabe warunki zbiornikowe piaskowców mogą sprzyjać powstawaniu niekonwencjonalnych nagromadzeń gazu typu *tight gas* (Kiersnowski et al., 2010).

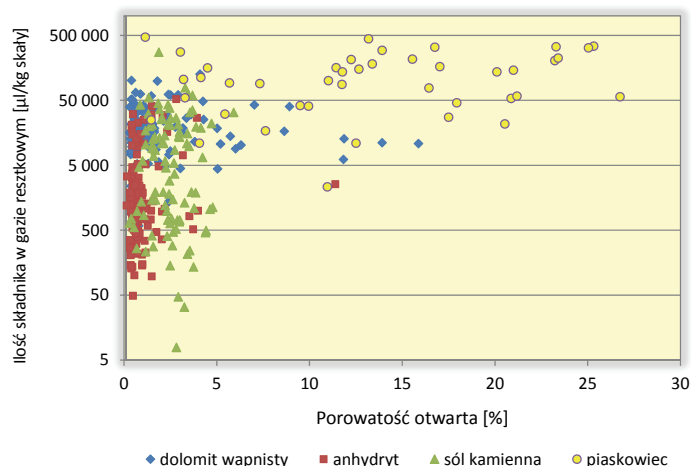
Dodatkowo brak serii łupków miedzionośnych lub znaczna redukcja miąższości (nawet poniżej 0,1 m) jest cechą charakterystyczną elewacji, co ułatwia migrację gazu ku górze, w utwory węglanowe cechsztynu. Piaskowiec budujący elewację jest silnie porowaty, przepuszczalny, co dodatkowo sprzyja zjawisku migracji gazu w tych strefach (Zawisza et al., 2010).

Z kolei cechsztyńskie skały węglanowe cyklotemu Werra, określane w literaturze geologicznej, jako wapień cechsztyński (Ca1), charakteryzują się znacznym zróżnicowaniem dotyczącym: miąższości, wykształcenia litologicznego i facjalnego oraz intensywności procesów diagenetycznych (Zawisza et al., 2010). Przykładowo w obrębie cechsztyńskich skał węglanowych Ca1 w rejonie ZG Rudna wyróżniono kilka typów dolomitów o różnych właściwościach petrofizycznych, zróżnicowanych zarówno pod względem porowatości sięgającej nawet 15%, jak i przepuszczalności (Poszytek i Suchan, 2016; Poszytek et al., 2018). Obecność gazu zamkniętego w porach dolomitów jest zjawiskiem dość powszechnym, jednak to obecność wysokociśnieniowych pułapek gazowych w obrębie lokalnie bardziej porowatych, mikroszczelinowatych i przepuszczalnych dolomitów stanowi zasadnicze zagrożenie (Suchan et al., 2013). Podobnie w przypadku opisywanych w literaturze próbek rdzeniowych z rejonu Rudnej, tak i dla badanych w ramach niniejszego opracowania próbek dolomitów wapienistych z rejonu Sieroszowice można zauważyć duże zróżnicowanie wyników. Dotyczy to zarówno oznaczeń ilościowo-jakościowych gazów, jak i właściwości petrofizycznych skał (przykładowo porowatość całkowita dla próbek dolomitu wapienistego wahała się w zakresie od 0,3% do 17,8%).

Należy brać również pod uwagę fakt, iż warunki strukturalne monokliny przedsudeckiej powodują, że prawdopodobna jest możliwość migracji gazu z dolomitu głównego do wapienia cechsztyńskiego (Kotarba et al., 2017).

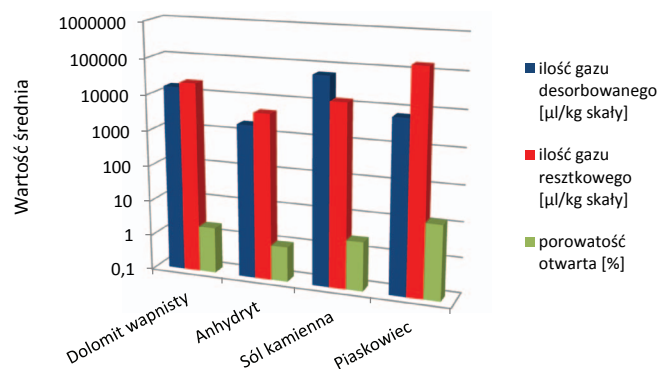
Porowatość otwarta, jako parametr charakteryzujący przepuszczalność badanych skał (Such, 1997; Sowizdzał et al., 2017) w analogiczny sposób, jak w przypadku porowatości całkowitej, koreluje z ilością wydzielonego gazu resztkowego. Dla grupy piaskowców średnia wartość porowatości otwartej wyniosła 13,3% (oraz rozrzutem wyników w zakresie od 1,1% do 26,7%), dla dolomitów wapienistych 2,0% (w zakresie od 0,3% do 15,9%), dla soli kamiennej 2,5% (z zdecydowanie mniejszym rozrzutem wyników od 0,3% do 5,9%) oraz dla anhydrytów 1,0% (w zakresie od 0,1% do 11,4%) – rys. 4 i 5.

Powierzchnia właściwa, jako sumaryczna powierzchnia porów przypadająca na jednostkę masy badanej skały, jest miarą wielkości oporu stawianego przez ośrodek



Rys. 4. Ilość gazu resztkowego w funkcji porowatości otwartej dla próbek rdzeniowych o różnym wykształceniu litologicznym

Fig. 4. The residual gas amount as a function of the open porosity for core samples of different lithology



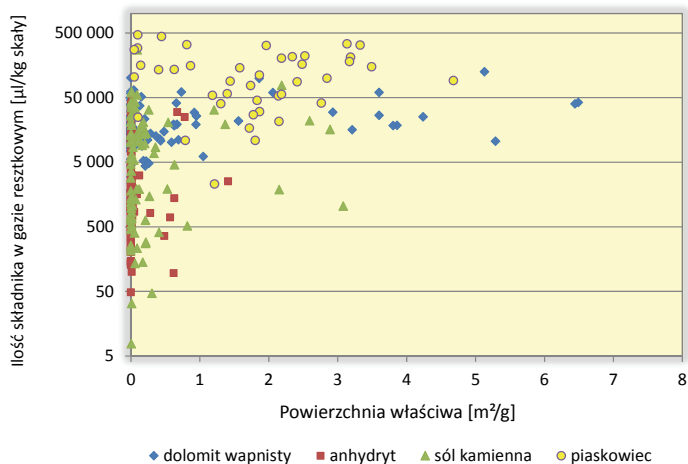
Rys. 5. Diagram przedstawiający wartości średnich ilości gazu (desorbowanego i resztkowego) oraz porowatości otwartej dla rdzeni o różnym wykształceniu litologicznym

Fig. 5. Diagram presenting the average values of the amount of gas (desorbed and residual) and the open porosity for cores of different lithology

porowaty przepływającemu płynowi. Średnia wartość powierzchni właściwej dla próbek reprezentujących piaskowiec wyniosła – 1,7 m²/g, dolomit wapienisty – 0,6 m²/g, sól kamienną – 0,3 m²/g oraz anhydryt 0,1 m²/g. Parametr ten jest skorelowany z wydzielonymi ilościami gazu resztkowego dla poszczególnych litologii (rys. 6 i 7).

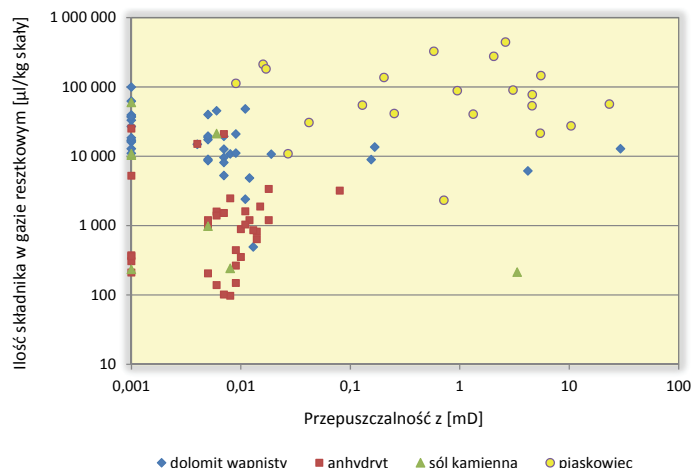
Próbki pochodzące z serii piaskowcowej charakteryzują się najwyższą średnią przepuszczalnością pionową o wartości 3,1 mD (i bardzo dużym rozrzutem wyników w zakresie od 0,01 mD do 23,3 mD). Stosunkowo wysokie wartości przepuszczalności pionowej stwierdzono także dla próbek dolomitu wapienistego, gdzie średnia wyniosła 0,9 mD, w szerokim zakresie pomiarów od 0 do 29,4 mD.

Na podstawie dostępnych wyników badań przepuszczalności (tab. 2) dla próbek anhydrytowych można stwierdzić, że w analizowanym obszarze, nie ma warunków do złożowej



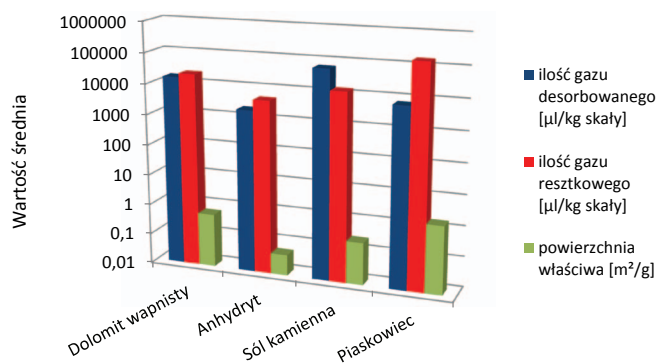
Rys. 6. Ilość gazu resztkowego w funkcji powierzchni właściwej dla próbek rdzeniowych o różnym wykształceniu litologicznym

Fig. 6. The residual gas amount as a function of the specific surface area for core samples of different lithology



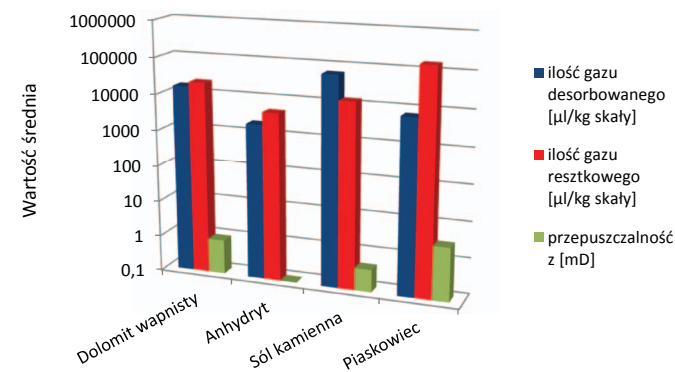
Rys. 8. Ilość gazu resztkowego w funkcji przepuszczalności pionowej (z) dla próbek rdzeniowych o różnym wykształceniu litologicznym

Fig. 8. The residual gas amount as a function of the vertical permeability (z) for core samples of different lithology



Rys. 7. Diagram przedstawiający wartości średnich ilości gazu (desorbowanego i resztkowego) oraz powierzchni właściwej dla rdzeni o różnym wykształceniu litologicznym

Fig. 7. Diagram presenting the average values of the amount of gas (desorbed and residual) and the specific surface area for cores of different lithology



Rys. 9. Diagram przedstawiający wartości średnich ilości gazu (desorbowanego i resztkowego) oraz przepuszczalności pionowej (z) dla rdzeni o różnym wykształceniu litologicznym

Fig. 9. Diagram presenting the average values of the amount of gas (desorbed and residual) and the vertical permeability (z) for cores of different lithology

koncentracji gazu ze względu na ich słabe właściwości kolektorskie skał (tj. bardzo niską przepuszczalność – rys. 9). Pojawiają się jednak warunki do wystąpienia lokalnych pułapek gazu w strefach o podwyższonej porowatości (nawet do 11,9% – tab. 2). W anhydrytach mogą zatem występować zamknięte „pułapki gazowe” o stosunkowo niewielkich rozmiarach, zawierające znaczne zawartości węglowodorów oraz ilości siarkowodoru (tab. 1).

Generalnie próbki soli kamiennej, charakteryzowane jako mało przepuszczalne dla gazów (Zawisza et al., 2010), wykazują średnią porowatość całkowitą rzędu 2,6% (z stosunkowo dużym rozrzutem wyników od 0,3% do aż 5,9%) oraz wartościami przepuszczalności pionowej sięgającymi maksymalnie 3,4 mD. Przeprowadzona analiza wzajemnego usytuowania spągu cechsztynu oraz pokładu soli zalegającego pomiędzy poziomem eksploatacji, a dolomitem głównym wskazuje,

że ukształtowanie powierzchni spągowej pokładu soli jest nieregularne, a jej odległość od poziomu eksploatacji jest zmienna (Kondratowicz, 1998). Odległość ta wynosi od minimum około 20 m do maksimum około 105 m. Nieregularne ukształtowanie spągu nieprzepuszczalnego pokładu soli, może sprzyjać tworzeniu się pułapek dla gazu, w których mogą występować węglowodory typu syngenetycznego, stwarzające zagrożenie dla wyrobisk górniczych (Zawisza et al., 2010).

Dyskusja i wnioski

Na podstawie wieloletnich badań dotyczących występowania objawów gazu i ropy w rejonie LGOM, zaobserwowano pewne prawidłowości, które posiadają analogię w stosunku

do prawidłowości stwierdzonych dla całej monokliny przed-sudeckiej. Dotyczy to zarówno zmienności w przestrzennym rozkładzie składu chemicznego gazu, w tym procentowego udziału węglowodorów, jak również powiązania zjawisk występowania gazu z pionowym profilem geologiczno-strukturalnym złoża, własnościami kolektorskimi skał budujących poszczególne poziomy litostratygraficzne, a także ze zjawiskami genetyczno-migracyjnymi (Zawisza et al., 2010).

W artykule przedstawiono korelację różnego typu parametrów geochemicznych z wykształceniem litologicznym badanych skał, pochodzących przede wszystkim z utworów miedzionośnych, w nawiązaniu do ich właściwości petrofizycznych. Badania przeprowadzono zarówno na próbkach gazu desorbowanego oraz na próbkach gazu resztkowego i na tej podstawie zostały określone pewne prawidłowości zmian jakościowo-ilościowych:

1. Ilość i skład molekularny gazów desorbowanych oraz gazów wydzielonych w trakcie degazacji rdzeni skalnych jest mocno skorelowany z wykształceniem litofacjnym badanych rdzeni (Kania i Janiga, 2018).
2. Badane próbki soli kamiennej o anomalnie wysokich ilościach gazu desorbowanego, wiążą się z dużą zawartością azotu nadmiarowego wydzielonego z otwartej przestrzeni porowej rdzenia. Azot, a tym samym duże ilości gazu desorbowanego w pokładach soli kamiennej można tłumaczyć selektywną adsorpcją gazu podczas migracji na duże odległości (prawdopodobnie z warstw karbońskich oraz ze złóż czerwonego spągowca (Kotarba et al., 2006) i wapienia cechsztyńskiego), chociaż azot może również mieć biogenne pochodzenie (Poszytek et al., 2018).
3. Zdecydowanie najwyższa ilość gazu resztkowego uzyskana została z serii piaskowców. Nieco mniejsze ilości gazu wydzielili się z kolei z próbek dolomitu wapnistego, jeszcze mniejsze zanotowano dla soli kamiennej, a najniższe dla próbek anhydrytowych. Średnie ilości wydzielonego gazu resztkowego doskonale korelują się z właściwościami petrofizycznymi, takimi jak: średnie wartości porowatości całkowitej i otwartej, powierzchnia właściwa oraz przepuszczalność.
4. Piaskowiec jest silnie porowaty i przepuszczalny, co sprzyja zjawisku kumulacji oraz migracji gazu w tych strefach (najwyższa średnia ilość gazu resztkowego spośród badanych litologii).
5. Na podstawie przeprowadzonej analizy dla badanych w ramach niniejszego opracowania próbek dolomitów wapnistych z rejonu Sieroszowic można zauważyć duże zróżnicowanie wyników. Dotyczy to zarówno oznaczeń ilościowo-jakościowych gazów, jak i właściwości petrofizycznych skał (przykładowo porowatość całkowita dla próbek dolomitu wapnistego wahała się w zakresie od 0,3% do maksymalnie 17,8% (gdzie mogą być kumulowane duże ilości gazu, co stanowi zasadnicze zagrożenie).
6. Dostępne wyniki badań przepuszczalności dla próbek anhydrytowych sugerują, że w analizowanym obszarze, nie ma warunków do złożowej koncentracji gazu ze względu na słabe właściwości kolektorskie skał (tj. bardzo niską przepuszczalność). Pojawiają się jednak warunki do wystąpienia lokalnych pułapek gazu w strefach o podwyższonej porowatości (nawet do 11,9%). W anhydrytach mogą zatem występować zamknięte „pułapki gazowe” o stosunkowo niewielkich rozmiarach, zawierające znaczne zawartości węglowodorów oraz ilości siarkowodoru.
7. Badane próbki soli kamiennej wykazują średnią porowatość całkowitą rzędu 2,6% (z stosunkowo dużym rozrzutem wyników od 0,3% do aż 5,9%) oraz wartościami przepuszczalności pionowej sięgającymi maksymalnie 3,4 mD. Nieregularne ukształtowanie spągu mało przepuszczalnego pokładu soli może zatem sprzyjać tworzeniu się pułapek dla gazu o wysokich zawartościach azotu nadmiarowego z domieszką węglowodorów, stanowiąc zagrożenie dla wyrobisk górniczych.
8. Wykonane prace potwierdzają celowość prowadzenia badań składu gazu desorbowanego i resztkowego, w celu przewidywania kierunków ekshalacji gazowych, co może przyczynić się do utrzymania bezpieczeństwa w kopalniach.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt.: *Ocena jakościowo-ilościowa gazów pochodzących z degazacji rdzeni skalnych na tle właściwości petrofizycznych* – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW; nr zlecenia: 47/SG/2018, nr archiwalny: DK-4100-47/2018.

Literatura

- Diamond W.P., Schatzel S.J., 1998. Measuring the gas content of coal: a review. *International Journal of Coal Geology*, 35: 311–331.
- Downorowicz S., 2007. Występowanie gazu ziemnego i ropy naftowej. Monografia KGHM Polska Miedź S.A.
- Janiga M., Kania M., 2014. Degazacja próbek skał – ocena ilościowa i jakościowa gazu resztkowego. *Nafta-Gaz*, 1: 8–13.
- Kania M., Janiga M., 2011. Elementy walidacji metody analitycznej oznaczania w mieszaninie gazowej związków węglowodorowych oraz N₂, O₂, CO i CO₂ za pomocą dwukanałowego, zaworowego chromatografu gazowego AGILENT 7890A. *Nafta-Gaz*, 11: 812–824.
- Kania M., Janiga M., 2018. Wpływ wykształcenia litofacjalnego na ilości skład molekularny gazu desorbowanego i resztkowego. *Nafta-Gaz*, 12: 884–893. DOI: 10.18668/NG.2018.12.02.
- Kiersnowski H., Buniak A., Kuberska M., Srokowska-Okońska A., 2010. Występowanie gazu ziemnego zamkniętego w piaskowcach czerwonego spągowca Polski. *Przegląd Geologiczny*, 58(4): 335–346.
- Kłapciński J., Peryt T.M., 2007. Budowa geologiczna monokliny przed-sudeckiej. Monografia KGHM Polska Miedź S.A.
- Kondratowicz G., 1998. Prognoza zagrożenia gazowego złoża rud miedzi zalegającego poniżej poziomu 1200 m. Wrocław: Cuprum, 9: 97–118.

- Kotarba M.J., Bilkiewicz E., Manecki M., Pawlik W., Ciesielczyk A., Selerowicz T., 2017. Pochodzenie i zagrożenia siarkowodorem i wysokociśnieniowym gazem ziemnym w złożu kopalń rud miedzi Polkowice–Sierszowice i Rudna – wstępne badania izotopowe i mineralogiczne. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 469: 9–34. DOI: 10.5604/01.3001.0010.0068.
- Kotarba M.J., Peryt T.M., Kosakowski P., Więclaw D., 2006. Organic geochemistry, depositional history and hydrocarbon generation modelling of the Upper Permian Kupferschiefer and Zechstein Limestone strata in south–west Poland. *Marine and Petroleum Geology*, 23: 371–386.
- Poszytek A., Dudek L., Rożek R., 2018. Presence of natural gas in basal facies of the Zechstein Limestone in a Copper Mine in SW Poland, *Journal of Petroleum Geology*, 41(1): 67–83.
- Poszytek A., Suchan, J., 2016. A tight gas reservoir in the basal facies of the Upper Permian Ca1 in the southwestern Zechstein Basin, Poland. *Facies*, 62(3): 1-13. DOI: 10.1007/s10347-015-0453-5.
- Sowizdzka K., Such P., Leśniak G., Słota-Valim M., 2017. Ocena wpływu właściwości petrofizycznych skał łupkowych na ich efektywność uszczelniania poziomów zbiornikowych i akumulacji złożowych. *Nafta-Gaz*, 10: 730–738. DOI: 10.18668/NG.2017.10.02.
- Such P., 1997. Nowoczesne metody badania właściwości petrofizycznych skał oraz możliwości zastosowania otrzymanych wyników w badaniach diagenety. *Przegląd Geologiczny*, 45(8): 781–784.
- Suchan, J., Rożek, R., Hryciuk, A., 2013. Warunki sedimentacji i zróżnicowanie facjalne Wapienia Cechsztyńskiego a zagrożenie gazowe i gazogeodynamiczne w O/ZG „Rudna”. KGHM Polska Miedź S.A. V Konferencja Sedymentologiczna POKOS 5’2013.
- Zawisza L., Krause E., Czekański E., Czopek Z., Dąbrowska B., Dąbrowski J., Gruszka A., Kozimor T., Marcinkowski A., Maruta M., Mularczyk A., Piestrzyński A., Przybyła P., Raś B., Wątor L., Wierziński K., Wójtowicz K., 2010. Prognoza potencjalnych obszarów akumulacji gazów, ocena gazonośności skał złożowych i otaczających oraz identyfikacja potencjalnych źródeł emisji węglowodorów wraz z drogami ich migracji w części złóż Sierszowice, Rudna oraz Głogów Głęboki Przemysłowy. Kraków: Stowarzyszenie Naukowe im. S. Staszica.



Mgr Małgorzata KANIA
Asystent w Zakładzie Geologii i Geochemii
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: malgorzata.kania@inig.pl



Mgr inż. Marek JANIGA
Asystent w Zakładzie Geologii i Geochemii
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: marek.janiga@inig.pl

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

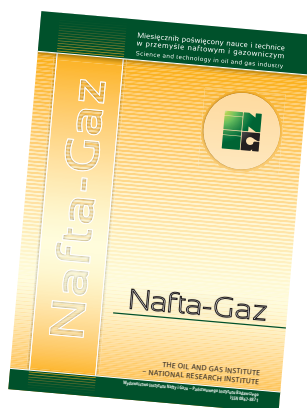
ul. Lubicz 25 A, 31-503 Kraków
telefon: +48 12 421 00 33
faks: +48 12 430 38 35
www.inig.pl office@inig.pl



Wiedza w zasięgu Twojej ręki

Wydawnictwa:

- ☛ miesięcznik „Nafta-Gaz”
- ☛ monografie „Prace Naukowe INiG – PIB”
- ☛ raport roczny „Rynek Polskiej Nafty i Gazu”
- ☛ unikalne słowniki branżowe



do nabycia w Redakcji Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego e-mailowo: nafta-gaz@inig.pl lub telefonicznie: +48 12 617 76 32