

Konrad Ziemiński

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

## Petrografia i granulometria utworów czerwonego spągowca – wstępna charakterystyka do poszukiwania złóż gazu zamkniętego (*tight gas*)

Utwory czerwonego spągowca, ze względu na obecne w nich złoża gazu, są od dziesięcioleci przedmiotem intensywnych badań geologicznych. Współcześnie obszar występowania tych utworów (dotychczas kojarzony ze złożami konwencjonalnymi) budzi zainteresowanie również pod kątem złóż niekonwencjonalnych (ang. *tight gas*). W artykule przedstawiono wyniki badań petrograficznych i granulometrycznych dla ponad 400 próbek, które przyporządkowane zostały facjom: eolicznej, fluwialnej, plai (jeziornej) oraz tzw. białego spągowca. W celu zbadania relacji pomiędzy składnikami szkieletu ziarnowego, spoiwami a rozkładem uziarnienia dokonano analizy korelacyjnej. Uzyskane wyniki powiązać będzie można z rezultatami analiz petrofizycznych (porowatość, przepuszczalność), co ułatwi stworzenie cyfrowych modeli 3D i umożliwi lokalizację potencjalnych złóż gazu.

Słowa kluczowe: czerwony spągowiec, gaz zamknięty, petrografia, granulometria, facje.

### Petrography and granulometry of the Polish Rotliegend sandstones – preliminary characteristics for tight gas exploration

Rotliegend sandstones are well known conventional gas reservoirs and have been a subject of intense geological investigation for decades. Nowadays, even more attention is paid to Rotliegend sandstones as they may also be reservoirs for unconventional gas – tight gas. This paper presents the results of petrographic and granulometric analyses for over 400 samples that have been described as sediments related to aeolian, fluvial, playa and so called “white Rotliegend” deposition systems. In order to investigate the relationships between the components of grains, cements and particle size distributions, correlation analysis was performed. Presented results may be directly linked with petrophysical (porosity, permeability) features of analyzed rocks, which enables to create detailed, digital 3D models of Rotliegend sediments. These models are powerful tools that can be used to locate new wells and new areas of interest.

Key words: Rotliegend, tight gas, petrography, granulometry, facies.

#### Cel badań

Utwory czerwonego spągowca, ze względu na obecne w nich złoża gazu, są od dziesięcioleci przedmiotem intensywnych badań geologicznych (sedymentologicznych) [3, 5, 10–12, 16, 18, 22, 29, 34], petrograficznych [1, 7–9, 13–15, 17, 20, 21, 25–27, 30, 35] oraz petrofizycznych [2, 4, 23, 24, 31]. Wciąż rosnące potrzeby energetyczne wymuszają nowe spojrzenie na poszukiwanie złóż gazu i zwrócenie uwagi na złoża niekonwencjonalne, w szczególności typu *tight gas*. Współczesne osiągnięcia na polu poszukiwań ropy

i gazu umożliwiają efektywniejsze wykorzystanie danych z badań laboratoryjnych poprzez ich implementację w cyfrowych modelach systemów naftowych, pozwalających nie tylko na wizualizację 3D obiektów złożowych, ale również na odtworzenie historii generacji i migracji węglowodorów. Efekty modelowania wpływają na pełniejsze zrozumienie procesów zachodzących w czasie geologicznym, jednocześnie wskazując na związki czasowo-przestrzenne pomiędzy skałami macierzystymi a zbiornikowymi.

Niniejsze opracowanie jest zestawieniem oraz interpretacją danych petrograficznych i granulometrycznych, pochodzących z analiz utworów czerwonego spągowca, i ma na celu, poprzez odniesienie się do wydzieleni facjalnych, stworzenie bazy danych (oraz zależności między nimi), którą wykorzystać będzie można do korelacji z parametrami petrofizycznymi, takimi jak np. porowatość czy przepuszczalność. Wynik połączenia puli danych petrograficznych z petrofizycznymi w efektywny sposób posłuży do opracowania szeregu różnego rodzaju modeli (np. model kompaktacji) i pozwoli na zlokalizowanie miejsc, w których można spodziewać się złóż gazu (zwłaszcza niekonwencjonalnych typu *tight gas*).

### Materiał badawczy

Charakterystykę petrograficzną piaskowców czerwonego spągowca oparto na wynikach analizy planimetrycznej, wykonanej dla 408 próbek pochodzących z 32 odwiertów. Natomiast w przypadku analizy granulometrycznej wykorzystano wyniki badań dla 495 próbek z 42 otworów. Dla większości próbek dysponowano kompletem wyników petrograficznych i granulometrycznych. Analizę planimetryczną i granulometryczną wykonano przy użyciu mikroskopu optycznego Nikon Eclipse LV100 POL, połączonego z cyfrową kamerą i zestawem komputerowym z zainstalowanym oprogramowaniem do cyfrowej analizy obrazu NIS-Elements BR 3.0. Obszar badań, wraz z naniesionymi wydzieleniami facjalnymi utworów czerwonego spągowca, przedstawiono na rysunku 1.

W obrębie analizowanych próbek wyróżniono szereg typów litologicznych. Są to głównie arenity (kwarcowe, subarkozowe, sublityczne i lityczne), a rzadziej bogatsze w ilasto-żelazistą matriks waki (kwarcowe, subarkozowe i sublityczne). Każdą z próbek przyporządkowano odpowiadającemu jej środowisku sedimentacyjnemu. Większość (niemal 75%) próbek stanowiły arenity i waki o genezie eolicznej (tablica 1). Stosunkowo wysoki udział w badanym materiale miały także skały przypisane facji utworów fluwialnych (około 17%), rzadziej natomiast opisywano utwory facji jeziornej (plaża, około 3%) czy też tzw. białego spągowca (około 5%).

Spośród różnorodnych typów litologicznych (tablica 2) najliczniejszą grupę stanowią arenity (89%), podczas gdy waki są dużo rzadsze (11%). W obrębie arenitów dominują



Rys. 1. Utwory czerwonego spągowca na terenie Polski [28]

Tablica 1. Przebadane próbki w kontekście przynależności facjalnej

Facje	Liczba próbek	Udział %
Eoliczne	304	74,51
Fluwialne	70	17,16
Biały spągowiec	22	5,39
Plaża	12	2,94

arenity sublityczne i subarkozowe, natomiast arenity kwarcowe i lityczne występują znacznie rzadziej. W obrębie wak wyróżnia się głównie waki sublityczne i subarkozowe, pobocznie spotykane są waki kwarcowe.

Tablica 2. Typy litologiczne w obrębie przebadanych próbek

Litologia	Liczba próbek	Udział %
Arenity kwarcowe	40	9,78
Arenity sublityczne	161,5*	39,49
Arenity lityczne	31	7,58
Arenity subarkozowe	129,5*	31,66
Waki kwarcowe	7	1,71
Waki sublityczne	20	4,89
Waki subarkozowe	20	4,89

\* W niezwykle rzadkiej sytuacji, gdy punkt na wykresie klasyfikacyjnym wypadł na granicy dwóch typów litologicznych, w ujęciu ilościowym podzielono go na pół i dodano do obu typów litologicznych.

### Szkielet ziarnowy

Szkielet ziarnowy analizowanych skał jest zbudowany z ziaren o frakcji od gruboziarnistego pyłu do średnioziarnistego piasku. Ziarna wykazują zmienny stopień obtoczenia: od ostrokrawędzistych do dobrze obtoczonych. Szkielet ziarnowy jest zwarty, tekstura – najczęściej bezładna, aczkolwiek gdzieś obserwuje się charakterystyczne laminy grubszego materiału w obrębie frakcji drobniejszej.

W składzie szkieletu ziarnowego dominuje kwarc (35÷84% obj., średnio 65% obj.). Obserwuje się zarówno ziarna kwarcu monokrystalicznego (33÷77% obj., średnio 57% obj.), jak i polikrystalicznego (do 19% obj., średnio 8% obj.). Część ziaren kwarcu posiada cechy wskazujące na ich pochodzenie ze skał metamorficznych oraz wulkanicznych.

Drugim istotnym składnikiem szkieletu ziarnowego są litoklasty. Wśród okruchów skał spotyka się zarówno skały magmowe, jak i metamorficzne oraz osadowe. Udział litoklastów jest bardzo zmienny i może osiągać nawet 35% obj. (średnio 8% obj.). Wśród okruchów skał magmowych można znaleźć zarówno skały głębinowe (różnego rodzaju granitoidy), jak i wylewne (ryolity, dacyty). Skały metamorficzne reprezentowane są przez łupki kwarcowo-łysz-

czykowe i kwarcyty, natomiast wśród okruchów skał osadowych obecne są piaskowce drobnoziarniste, mułowce oraz iłowce. Spośród litoklastów najczęściej obserwuje się skały wulkaniczne (do 32% obj., średnio 4,5% obj.) oraz głębinowe (do 19% obj., średnio 3% obj.). Skały metamorficzne (do 3% obj., średnio 0,17% obj.) oraz osadowe (do 6% obj., średnio 0,5% obj.) są rzadziej spotykane.

Oprócz kwarcu i litoklastów w szkielecie ziarnowym badanych arenitów i wak stosunkowo często obserwuje się ziarna skaleni. Są to zarówno skalenie potasowe (mikroklin), jak również plagioklasy (albit, oligoklaz). Udział skaleni nie przekracza 11% obj., osiągając średnią zawartość w analizowanych próbkach na poziomie około 4% obj. Skalenie dość wyraźnie dotknięte są procesem serycytyzacji. Część ziaren uległa także częściowemu lub całkowitemu rozpuszczeniu, przyczyniając się do rozwoju wtórnej porowatości.

W analizowanych skałach spotyka się również łyszczyki (muskowit) oraz minerały akcesoryczne (cyrkon, turmalin, apatyt) i nieprzeźroczyste (tlenki żelaza). Są one dość częste, aczkolwiek występują w bardzo niewielkich ilościach.

### Spoiwo

W przestrzeni porowej analizowanych skał zauważyć można szereg różnego typu spoiw. Są to w głównej mierze: ilasto-żelazista matriks oraz cementy: ilasty, węglanowy, siarczanowy oraz kwarcowy.

Matriks ilasto-żelazista jest mieszaniną pyłu kwarcowego z minerałami ilastymi (illit) i związkami żelaza. Spoiwo tego typu obserwuje się w porach. Może ono również tworzyć cienkie obwódki na ziarnach detrytycznych. Matriks jest stosunkowo powszechna, a jej zawartość w nielicznych przypadkach dochodzić może nawet do 38% obj. (przy czym średni udział jest na poziomie 7% obj.).

Poza detrytycznym materiałem ilastym w badanych skałach obecne są również autigeniczne minerały ilaste, przede wszystkim illit i chloryt. Illit wykształcony jest w postaci drobnych łuseczek i włókien. Często tworzy obwódki na ziarnach detrytycznych, może również zarastać przestrzeń porową. Chloryty obecne są w postaci blaszek mogących tworzyć skupienia lub bardzo cienkie obwódki na ziarnach detrytycznych. Udział autigenicznych minerałów ilastych nie przekracza 14,5% obj., przy czym średnio jest ich dużo mniej, tj. około 1,5% obj.

Bardzo istotnym składnikiem spoiwa są cementy węglanowe. Wyróżnia się tu cement kalcytowy oraz dolomitowy.

Cement kalcytowy najczęściej występuje jako wypełnienia porów, może on również częściowo zastępować mniej stabilne chemicznie ziarna, takie jak skalenie czy okruchy skał wulkanicznych. Obserwowane kalcyty mogą zawierać domieszki manganu i dwuwartościowego żelaza. Doloomit wykształcony jest w postaci romboedrow, wypełniających pory w stosunkowo niewielkim stopniu. Udział węglanów w badanych próbkach może sięgać 41% obj., przy czym najczęściej jest on znacznie niższy (średnio 9,5% obj.).

Kolejnym typem spoiwa są cementy siarczanowe. Najczęściej spotykany jest anhydryt, wypełniający pory w sposób podobny do kalcytu.

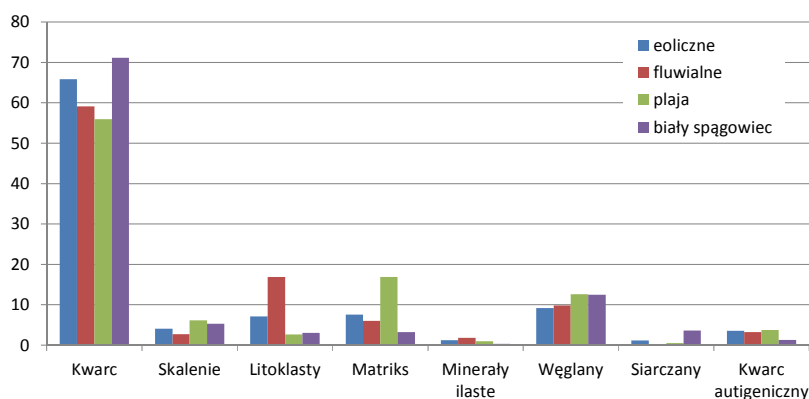
Zawartość anhydrytu w badanych profilach jest stosunkowo niska (średnio 1% obj.), aczkolwiek w przypadku niektórych próbek (zwłaszcza w przystropowych partiach badanych profili) jego udział może zostać znacząco zwiększony i sięgać nawet do 23% obj., co prawdopodobnie związane jest z infiltracją wód cechsztyńskich.

Ostatnim typem cementu, który występuje w badanych próbkach, jest autigeniczny kwarc. Obecny jest on w postaci niepełnych obwódek na detrytycznych ziarnach lub też jako wypełnienie porów. Jego udział sięga maksymalnie 21% obj., przy czym najczęściej jest znacznie niższy i wynosi średnio 3,5% obj.

Średnie udziały głównych składników szkieletu ziarnowego w odniesieniu do wydzieleni facjalnych przedstawiono na rysunku 2. Generalnie nie zaznaczają się żadne istotne różnice w składzie mineralnym w obrębie różnych facji, z kilkoma wyjątkami. Oto one:

- wśród osadów fluwialnych obserwuje się zdecydowanie zwiększony udział litoklastów skał magmowych (wulkanicznych i głębinowych). Średnia zawartość litoklastów, wynosząca około 17% obj., jest tu wyższa od średniego udziału tych składników w innych facjach, gdzie mieszczą się one w przedziale 2,5÷7% obj.;
- udział ilasto-żelazistej matriks jest zdecydowanie większy w osadach jeziornych (plaja), osiągając średnią zawartość na poziomie 17% obj. Wartość ta jest wyraźnie wyższa w porównaniu z innymi facjami, gdzie średni udział matriks nie przekracza 8% obj.;
- osady facji białego spągowca wyróżniają się na tle innych największą średnią zawartością siarczanów (około 3,5% obj.), a także najmniejszym średnim udziałem matriks (rzędu 3% obj.) oraz cementu kwarcowego (<1,5% obj.).

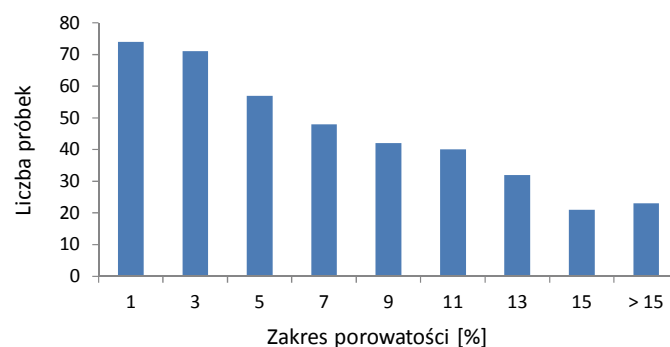
Analizowane próbki charakteryzują się zmiennym udziałem porowatości – od bliskiej zera do 20,5% obj. (średnio 6% obj.). Największą średnią porowatość zaobserwowano w próbkach facji białego spągowca i facji eolicznej (odpowiednio:



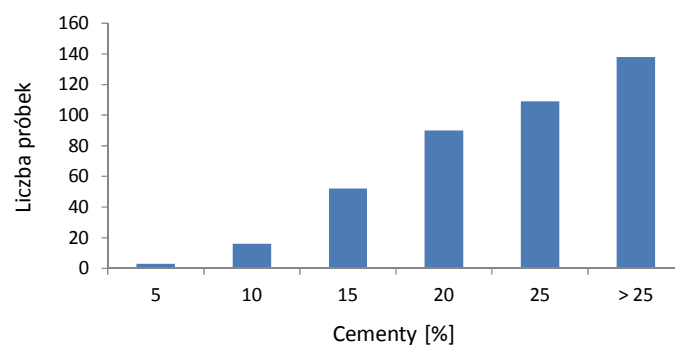
Rys. 2. Średni udział najważniejszych składników szkieletu ziarnowego oraz spoiwa w odniesieniu do wydzieleni facjalnych dla badanych próbek

8 i 7% obj.), najmniejszą natomiast (<1% obj.) dla utworów plał. Porowatość wykształcona jest jako pory, szczeliny obserwuje się rzadko i są najczęściej pojedyncze, nie tworzą rozbudowanych systemów. Ciekawym zjawiskiem, związanym z wkładkami (laminami) grubszego materiału w obrębie drobniejszych ziaren, jest obecność tzw. pseudoszczelin, czyli stref o podwyższonej porowatości, przypominających szczeliny, a w rzeczywistości będących połączonymi ze sobą dużymi porami.

Udział porowatości i cementów dla wszystkich próbek w wydzielonych przedziałach przedstawiają rysunki 3 i 4. Wśród przebadanych skał najliczniej reprezentowane są te, których porowatość nie przekracza 5% obj. (49,5%), nato-



Rys. 3. Udział porowatości w przebadanych próbkach



Rys. 4. Udział cementów w przebadanych próbkach

miast próbki o wysokich porowatościach (powyżej 15%) stanowią jedynie 5,5%. Suma spoiw w przebadanych prób-

kach jest przeważnie większa niż 20% obj. (60,5% wszystkich próbek).

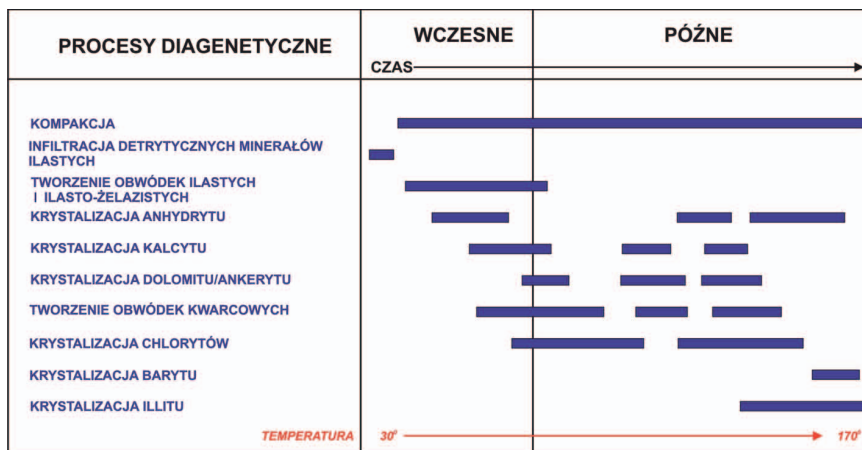
**Diageneza**

Analizowane skały ulegały procesom diagenetycznym (kompakcja, cementacja, rozpuszczanie, zastępowanie, przeobrażanie), spośród których na redukcję pierwotnej porowatości największy wpływ miały kompaktacja i cementacja. Kompaktacja doprowadziła do zwiększenia upakowania okruczków w szkielecie ziarnowym, natomiast cementacja ograniczyła przestrzeń porową poprzez kształtowanie się szeregu różnych typów cementów, m.in. ilastego, kwarcowego, węglanowego czy anhydrytowego. Powstanie tych cementów związane jest z infiltracją wód gruntowych i atmosferycznych. O ile kompaktacja zachodziła od samego początku lityfikacji i trwała nieprzerwanie, o tyle cementacja jest wyraźnie etapowa i nierozzerwalnie związana ze zmieniającymi się warunkami temperaturowo-ciśnieniowymi.

Wydaje się, iż jako pierwsze wytworzyły się obwódki ilasto-żelaziste, co jest wynikiem infiltracji wód niosących zawieszinę minerałów ilastych i żelazistych, której stałe składniki odkładały się na ziarnach detrytycznych. Wody te mogły zawierać również krzemionkę, która wytrącała się w postaci obwódek na ziarnach lub bezpośrednio w porach. Jej źródłem na późniejszym etapie diagenezy mogły być również minerały, które uległy rozpuszczaniu, tj. łyszczyki, skalenie, a także okruczki skalne [15]. Ten sam proces mógł doprowadzić do krystalizacji chlorytu i smektytu. Wraz ze wzrostem temperatury i ciśnienia proces rozpuszczania ulegał coraz większej intensyfikacji, a jego finalnym efektem jest krystalizacja illitu. Krystalizacja cementów węglanowych (zarówno kalcytu, jak i dolomitu) odbywała się na kilku etapach diagenezy, zaczynając od jej wczesnej fazy, a na później kończąc.

Schematycznie etapy tworzenia się różnego rodzaju spoiw i ich kolejność przedstawiono na rysunku 5.

W obrębie badanych próbek na utratę pierwotnej porowatości (w przeważającej ilości przypadków) większy wpływ miała kompaktacja niż cementacja. Proces kompaktacji jest dominujący dla 68% próbek, podczas gdy cementacja przeważa jedynie w co trzeciej próbce. Współczynnik COPL (utrata pierwotnej porowatości w wyniku kompaktacji) wynosi od 2 do 39% (średnio 23%). Parametr CEPL (utrata pierwotnej porowatości w wyniku cementacji) zawiera się w podobnym zakresie: od 2 do 38%, jednak jego średnia wartość jest niższa i wynosi 17%. Współczynnik kompaktacji (ICOMPACT)



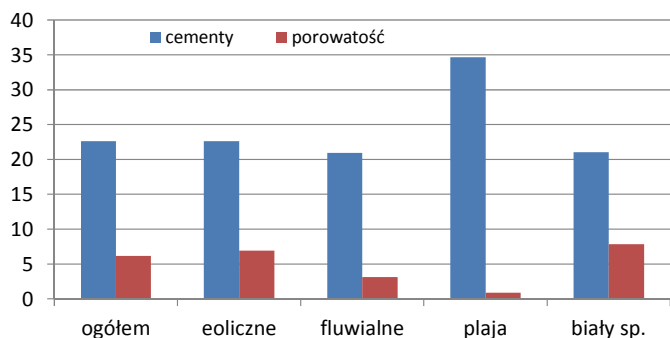
Rys. 5. Sekwencja diagenetyczna osadów czerwonego spągowca dla badanego obszaru [15]

zawiera się w szerokim przedziale: od 7 do 95%, przy średniej wartości 56%. Zmienność wyżej wymienionych parametrów w odniesieniu do facji ujęto w tabelicy 3, natomiast udział cementów oraz porowatości w badanych skałach przedstawia rysunek 6 oraz tablica 4.

Tablica 3. Parametry CEPL, COPL oraz ICOMPACT w odniesieniu do wydzielonych facji

Facje	CEPL [%]	COPL [%]	ICOMPACT	
Eoliczne	2,56	1,79	0,07	min.
	37,67	38,36	0,94	maks.
	17,79	21,75	0,55	średnia
Fluwialne	2,26	4,65	0,13	min.
	34,16	39,38	0,95	maks.
	15,02	27,71	0,65	średnia
Plaja	12,86	6,14	0,14	min.
	38,20	31,25	0,71	maks.
	25,65	18,58	0,42	średnia
Biały spągowiec	6,31	6,62	0,20	min.
	26,33	30,99	0,83	maks.
	16,54	22,28	0,57	średnia

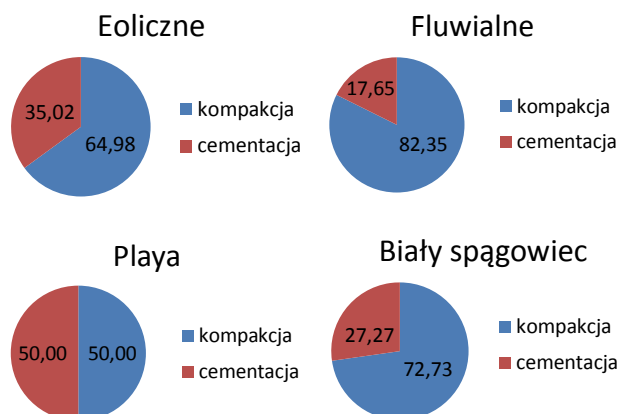
Analiza procesów kompaktacji i cementacji w odniesieniu do facji pozwoliła stwierdzić, iż wpływ obu tych czynników jest różny w zależności od środowiska sedymentacji. Facja utworów fluwialnych charakteryzuje się wyraźną dominacją kompaktacji nad cementacją (rysunek 7) – współczynnik COPL jest dla 82% próbek większy od parametru CEPL, co więcej, jego średnia wartość jest najwyższa i wynosi blisko 28%. Od-



Rys. 6. Udział cementów oraz porowatości w odniesieniu do facji

Tablica 4. Udział cementów oraz porowatości w odniesieniu do wydzielonych facji

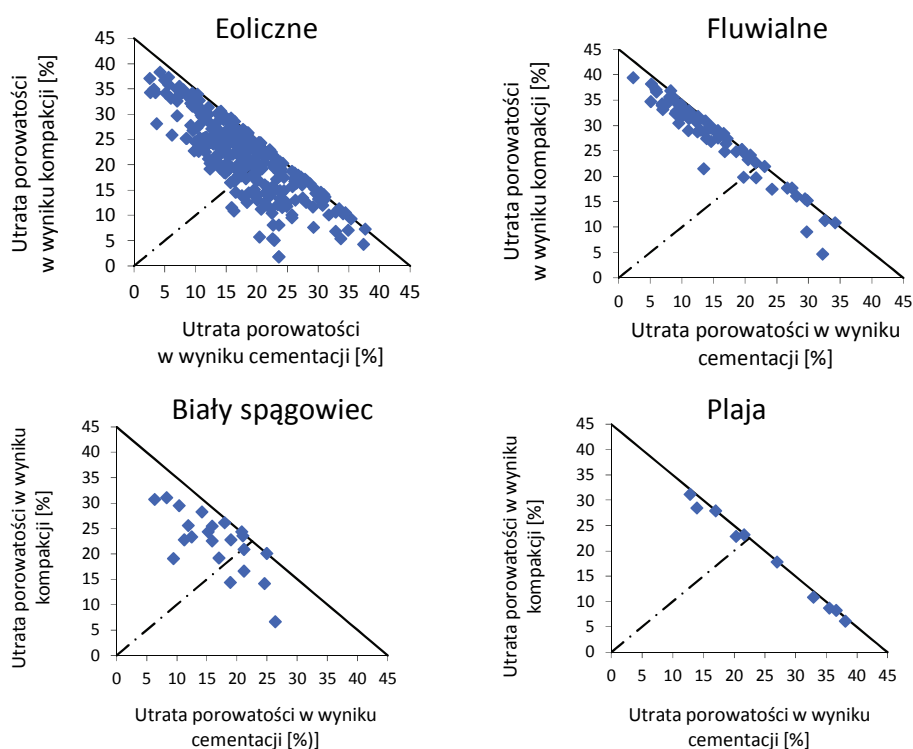
Facje	Cementy [%]	Pory [%]	
Eoliczne	4,07	0,00	min.
	47,32	20,00	maks.
	22,64	6,90	średnia
Fluwialne	3,72	0,00	min.
	54,50	12,89	maks.
	20,94	3,11	średnia
Plaża	18,70	0,00	min.
	62,00	3,50	maks.
	34,67	0,88	średnia
Biały spągowiec	9,10	0,00	min.
	31,20	20,40	maks.
	21,04	7,83	średnia



Rys. 7. Udział próbek, w których zaobserwowano dominację procesów kompaktacji bądź cementacji w odniesieniu do facji

wrotną sytuację obserwuje się dla utworów plał, gdzie udział próbek z dominacją kompaktacji nad cementacją jest najniższy (zaledwie 50%), za to średnia wartość parametru CEPL jest najwyższa (około 26%). Facje utworów eolicznych oraz białego spągowca są do siebie zbliżone, biorąc pod uwagę wpływ kompaktacji i cementacji – który nie jest tak charakterystyczny, jak w przypadku utworów facji fluwialnej i plał.

Wpływ kompaktacji i cementacji na redukcję pierwotnej porowatości przedstawiono na rysunku 8 [19]. Pierwotna porowatość stosunkowo dobrze zachowana się w utworach eolicznych i białego spągowca.



Rys. 8. Wpływ kompaktacji i cementacji na utratę pierwotnej porowatości w odniesieniu do wydzielonych facji [19]

### Analiza granulometryczna

Analiza granulometryczna przeprowadzona została na płytkach cienkich. Dla każdej próbki zmierzono 350 średnic ziaren, co pozwoliło na wyliczenie podstawowych parametrów granulometrycznych i zakwalifikowanie ich do odpowiednich przedziałów zmienności [6, 32, 33]. Posłużono się następującymi wzorami [6]:

średnia średnica:

$$GSS = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84}}{3}$$

wysortowanie:

$$GSO = \frac{\Phi_{84} - \Phi_{16}}{4} + \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{6,6}$$

skośność:

$$GSK = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{84} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{\Phi_5 + \Phi_{95} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{95} - \Phi_5)}$$

splaszczanie:

$$GSP = \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{2,44(\Phi_{75} - \Phi_{25})}$$

gdzie:

$\Phi_5, \Phi_{16}, \Phi_{50}, \Phi_{75}, \Phi_{84}, \Phi_{95}$  – percentyle rozkładu uziarnienia, odczytane z krzywej kumulacyjnej.

Przebadane skały reprezentują wszystkie opisane w części petrograficznej facje, tj. utwory eoliczne, fluwialne, jeziorne (plaja) oraz tzw. biały spągowiec. Najliczniejsze są osady wydmowe (eoliczne). Stanowią one ponad 80% ogółu skał, natomiast drugą, zdecydowanie mniej licznie reprezentowaną facją (12%), są utwory białego spągowca.

Wśród przeanalizowanych próbek dominują piaskowce średnioziarniste (48,5%) oraz drobnoziarniste (49,7%), podczas gdy inne granulacje nie przekraczają 1%. Graficzna średnia średnica (GSS) przyjmuje wartości od 1,55 do 4,58  $\phi$ .

Stopień wysortowania (parametr graficznego średniego odchylenia, będący miarą rozproszenia wartości średnic ziaren – GSO) w połowie przebadanych próbek jest umiar-

kowanie dobry. Dość znaczny udział mają również próbki o umiarkowanym (21,8%) oraz dobrym (26%) stopniu wysortowania, a zdecydowanie mniej liczne są próbki, gdzie parametr ten odpowiada słabemu wysortowaniu (1,8%). Ogółem GSO zawiera się w zakresie od 0,357 do 1,308.

Graficzna skośność (GSK, miara asymetrii rozkładu) w obrębie analizowanych skał przyjmuje wartości zarówno dodatnie, jak i ujemne (od -0,52 do 0,32). Przebadane próbki charakteryzują się w przeważającej mierze (56%) w przybliżeniu symetrycznym rozkładem uziarnienia. Zdecydowanie mniej jest próbek, w których zanotowano rozkład skośnie ujemny lub skośnie dodatni, a jedynie wyjątkowo pojawiają się przypadki, gdzie rozkład uziarnienia jest skośny bardzo ujemnie lub bardzo dodatnio.

Analiza graficznego splaszczania (GSP, miara zagęszczenia wyników wokół wartości centralnej) w obrębie badanych skał wskazuje, że analizowane próbki wykazują głównie mezokurtyczny (60,4%) rozkład uziarnienia. Rozkłady leptokurtyczne i platykurtyczne są rzadsze (odpowiednio: 22,8 oraz 15%), natomiast sporadycznie (1,8%) obserwuje się rozkład bardzo leptokurtyczny.

Interesujące jest porównanie podstawowych parametrów granulometrycznych w stosunku do przynależności facjalnej. Parametr średniej średnicy w przypadku utworów eolicznych odpowiada w głównej mierze utworom zarówno drobno- jak i bardzo drobnoziarnistym (po około 49%). Utwory bardzo drobnoziarniste zdecydowanie dominują w facji

Tablica 5. Udział procentowy próbek w odniesieniu do klas wielkości ziaren w obrębie wydzielonych facji

	Klasa			
	Piasek			Pył
	średnioziarnisty	drobnoziarnisty	bardzo drobnoziarnisty	gruboziarnisty
Eoliczne	1,00	<b>49,25</b>	<b>49,75</b>	0,00
Fluwialne	0,00	11,11	<b>83,33</b>	5,56
Plaja	0,00	0,00	<b>71,43</b>	28,57
Biały spągowiec	0,00	<b>65,57</b>	34,43	0,00

Tablica 6. Udział procentowy próbek o różnym stopniu wysortowania w odniesieniu do facji

	Stopień wysortowania			
	dobry	umiarkowanie dobry	umiarkowany	słaby
Eoliczne	23,63	<b>49,25</b>	24,88	2,24
Fluwialne	<b>44,44</b>	<b>50,00</b>	5,56	0,00
Plaja	21,43	<b>71,43</b>	7,14	0,00
Biały spągowiec	<b>39,34</b>	<b>50,82</b>	9,84	0,00

fluwialnej oraz jeziornej (plaży), gdzie osiągają odpowiednio: 83% i 71%. Większe średnice (utwory drobnoziarniste) przeważają natomiast w przypadku utworów białego spągowca (65%) – tablica 5.

Utwory eoliczne wykazują przewagę skał o umiarkowanie dobrym stopniu wysortowania (49%), przy czym próbki o dobrym i umiarkowanym wysortowaniu również występują dość licznie (około 25%). Utwory fluwialne są przeważnie dobrze (44%) bądź umiarkowanie dobrze (50%) wysortowane, co jest wynikiem zbliżonym do utworów białego spągowca (dobrze wysortowane – 39%, umiarkowanie dobrze – 51%). Wśród przebadanych próbek skały powstałe w środowisku jeziornym wykazują naj-

wiekszy udział ziaren umiarkowanie dobrze wysortowanych (71%) – tablica 6.

W przypadku parametru skośności dla utworów eolicznych, plał oraz białego spągowca obserwuje się głównie w przybliżeniu symetryczny rozkład uziarnienia, a w mniejszym stopniu skośny ujemnie. Rozkład uziarnienia widoczny dla utworów fluwialnych jest nieco inny: dominuje skośny dodatnio i w przybliżeniu symetryczny, a rzadziej obserwuje się rozkład skośny ujemnie. Analiza spłaszczenia rozkładu uziarnienia w przypadku utworów eolicznych, fluwialnych i białego spągowca wskazuje na dominację rozkładu mezokurtycznego, a w przypadku utworów plał na przewagę rozkładu mezokurtycznego i leptokurtycznego.

### Korelacje petrograficzno-granulometryczne

Spośród analizowanych próbek wybrano te, które posiadały komplet wyników jednocześnie: z analizy petrograficznej i granulometrycznej. Było to ogółem 208 próbek pochodzących z 23 odwiertów. Wykonano dla nich analizę korelacyjną, która uwzględniała składniki szkieletu ziarnowego (kwarc, skalenie, litoklasty, minerały akcesoryczne i nieprzeźroczyste), spoiwa (matriks, autigeniczne minerały ilaste, węglany, siarczany, autigeniczny kwarc), porowatość oraz parametry granulometryczne, takie jak: średnia średnica, wysortowanie, skośność oraz spłaszczenie. Wyniki korelacji przedstawiono w tabeli 8. Największe zależności (współczynnik korelacji  $>0,5$  lub  $<-0,5$ ) zaobserwowano dla kwarcu, matriks ilasto-żelazistej oraz parametrów średniej średnicy i wysortowania. Oto one:

- udział kwarcu maleje wraz ze wzrostem zawartości matriks ilasto-żelazistej (współczynnik korelacji  $-0,52$ ),
- udział matriks ilasto-żelazistej rośnie wraz ze zmniejszaniem się średniej średnicy (współczynnik korelacji  $0,63$ ).

Zauważalne zależności (współczynnik korelacji  $>0,4$  lub  $<-0,4$ ) występują również pomiędzy kwarcem, skaleniami, litoklastami oraz średnią średnicą. I tak:

- porowatość rośnie wraz ze wzrostem udziału kwarcu (współczynnik korelacji  $0,41$ ),
- udział kwarcu zmniejsza się wraz ze spadkiem wielkości ziaren (współczynnik korelacji  $-0,48$ ),
- udział skaleni jest powiązany z zawartością litoklastów (współczynnik korelacji  $0,40$ ),

- porowatość spada wraz ze wzrostem udziału węglanów.

Spośród grupy próbek z kompletem wyników petrograficznych i granulometrycznych wyselekcjonowano te, które należą do facji eolicznej (w sumie 172 próbki) i przeprowadzono analizę korelacji tych samych parametrów co dla wszystkich próbek. Otrzymane wyniki przedstawiono w tablicy 9. Porównanie współczynników korelacji uzyskanych dla wszystkich próbek z otrzymanymi dla próbek należących do facji eolicznej zaprezentowano w tablicy 7. Przeważnie różnice nie są duże, za wyjątkiem zależności zawartości kwarcu od porowatości i średniej średnicy, gdzie współczynniki korelacji w przypadku próbek należących do facji eolicznej są niższe i wynoszą odpowiednio:  $0,30$  oraz  $-0,32$ .

Tablica 7. Porównanie wybranych współczynników korelacji uzyskanych dla wszystkich próbek i dla próbek należących do facji eolicznej

Zależności	Współczynnik korelacji	
	wszystkie próbki	utwory eoliczne
Kwarc – matriks	$-0,52$	$-0,47$
Kwarc – porowatość	$0,41$	$0,30$
Kwarc – średnia średnica	$-0,48$	$-0,32$
Skalenie – litoklasty	$0,40$	$0,46$
Matriks – średnia średnica	$0,63$	$0,60$
Węglany – porowatość	$-0,45$	$-0,45$
Wysortowanie – skośność	$-0,54$	$-0,57$

### Znaczenie uzyskanych wyników w poszukiwaniach złóż gazu

Otrzymane wyniki stanowią bazę parametrów petrograficznych i granulometrycznych dla utworów czerwonego spągowca na stosunkowo dużym obszarze. Jest to podstawa, którą dość łatwo można skorelować z wynikami analiz petrofizycznych

(piknometria helowa, porozymetria azotowa) i ustalić związki pomiędzy kluczowymi dla geologii naftowej parametrami, takimi jak porowatość i przepuszczalność, a wykształceniem petrograficznym, facjalnym oraz rozkładem uziarnienia.



Tablica 8. Współczynniki korelacji parametrów petrograficznych i granulometrycznych dla wszystkich próbek

	Kwarc	Skalenie	Litoklasty	Minerały akcesoryczne i łyszczyki	Spoiwo					Pory
					matriks ilasta i ilasto-żelazista	autigeniczne minerały ilaste	węglany	siarczany	kwarc autigeniczny	
Skalenie	-0,14	x								
Litoklasty	-0,22	0,40	x							
Minerały akc. i niep., łyszczyki	-0,22	-0,07	-0,07	x						
Matriks ilasta i ilasto-żelazista	-0,52	-0,16	-0,11	0,38	x					
Autigeniczne minerały ilaste	-0,01	-0,20	-0,06	0,08	-0,01	x				
Węglany	-0,26	-0,19	-0,14	-0,26	-0,28	-0,21	x			
Siarczany	-0,09	-0,06	-0,09	-0,08	-0,21	-0,09	-0,10	x		
Kwarc autigeniczny	-0,26	0,25	0,23	0,15	-0,12	0,20	-0,26	-0,04	x	
Porowatość	0,41	0,15	0,09	0,13	-0,03	0,16	-0,45	-0,17	-0,09	x
GSS	-0,48	-0,30	-0,24	0,22	0,63	0,12	0,08	0,00	-0,22	-0,19
GSO	0,01	0,11	0,36	-0,01	-0,01	-0,06	-0,03	-0,19	0,01	-0,14
GSK	0,22	-0,08	-0,25	-0,03	-0,28	0,06	0,06	0,16	0,03	0,09
GSP	-0,19	0,01	0,13	0,12	0,22	-0,04	-0,09	-0,06	0,10	-0,11

Tablica 9. Współczynniki korelacji parametrów petrograficznych i granulometrycznych dla próbek należących do facji eolicznej

	Kwarc	Skalenie	Litoklasty	Minerały akcesoryczne i łyszczyki	Spoiwo					Pory
					matriks ilasta i ilasto-żelazista	autigeniczne minerały ilaste	węglany	siarczany	kwarc autigeniczny	
Skalenie	-0,21	x								
Litoklasty	-0,32	0,46	x							
Minerały akc. i niep., łyszczyki	-0,17	-0,07	0,00	x						
Matriks ilasta i ilasto-żelazista	-0,47	-0,15	-0,08	0,39	x					
Autigeniczne minerały ilaste	0,07	-0,17	-0,06	0,05	-0,12	x				
Węglany	-0,18	-0,21	-0,14	-0,35	-0,32	-0,20	x			
Siarczany	-0,11	-0,06	-0,15	-0,06	-0,16	-0,11	-0,10	x		
Kwarc autigeniczny	-0,26	0,26	0,25	0,08	-0,21	0,17	-0,27	0,00	x	
Porowatość	0,30	0,24	0,00	0,25	0,06	0,19	-0,45	-0,17	-0,05	x
GSS	-0,32	-0,34	-0,23	0,22	0,60	0,15	-0,01	0,00	-0,31	-0,01
GSO	-0,08	0,10	0,36	0,02	0,00	-0,08	0,05	-0,20	0,01	-0,26
GSK	0,26	-0,08	-0,26	-0,10	-0,30	0,06	0,06	0,16	0,04	0,09
GSP	-0,27	-0,05	0,13	0,14	0,30	-0,02	-0,07	-0,10	0,07	-0,11

Otrzymuje się w ten sposób niezwykle bogaty zestaw danych stanowiących wartościowy wkład do konstrukcji cyfrowych modeli 3D. Modele takie pozwalają na nowe spojrzenie na

znany poniekąd obszar poszukiwań i określenie potencjalnych miejsc, w których odkrycie nowych złóż (zwłaszcza niekonwencjonalnych typu *tight gas*) jest najbardziej prawdopodobne.

## Podsumowanie

1. Wśród utworów czerwonego spągowca spotyka się szereg typów litologicznych. Są to głównie arenity (kwarcowe, subarkozowe, sublityczne i lityczne), a rzadziej bogatsze w ilasto-żelazistą matriks waki (kwarcowe, subarkozowe i sublityczne).
2. W składzie szkieletu ziarnowego dominuje kwarc (monokrystaliczny i polikrystaliczny). Drugim istotnym jego składnikiem są okruchy skał magmowych (granitoidy, ryolity, dacyty), metamorficznych (łupki kwarcowo-łuszczkowe, kwarcyty) i osadowych (piaskowce, mułowce, iłowce). Stosunkowo często obecne są także ziarna skaleni (potasowe – mikroklin, plagioklasy – albit, oligoklaz). Spotyka się również łuszczki (muskowit) oraz minerały akcesoryczne (cyrkon, turmalin, apatyt) i nieprzeźroczyste (tlenki żelaza).
3. W przestrzeni porowej analizowanych skał wyróżnić można szereg różnego typu spoiw, m.in. ilasto-żelazistą matriks oraz cementy: ilasty, węglanowy, siarczanowy i kwarcowy.
4. Wśród osadów fluwialnych obserwuje się zdecydowanie zwiększoną zawartość litoklastów skał magmowych (wulkanicznych i głębinowych). Udział ilasto-żelazistej matriks jest zdecydowanie największy w osadach jeziornych (plaja). Osady facji białego spągowca wyróżniają się na tle innych największą średnią zawartością siarczanów, a także najmniejszym średnim udziałem matriks oraz cementu kwarcowego.
5. Analizowane skały charakteryzują się zmiennym udziałem porowatości – od bliskiej zera do 20,5% obj. Największą średnią porowatość zaobserwowano w obrębie facji białego spągowca i facji eolicznej, najmniejszą natomiast dla utworów plai.
6. Utwory czerwonego spągowca uległy szeregowi procesów diagenetycznych (kompakcja, cementacja, rozpuszczanie, zastępowanie, przeobrażanie), spośród których na redukcję pierwotnej porowatości największy wpływ miały kompakcja i cementacja. Najczęściej kompakcja dominowała nad cementacją – sytuacja taka jest najbardziej widoczna w przypadku utworów facji fluwialnej, a najmniej dostrzegalna dla utworów jeziornych.
7. Wśród przeanalizowanych utworów czerwonego spągowca zdecydowanie dominują piaskowce średnioziarniste oraz drobnoziarniste, podczas gdy inne granulacje nie przekraczają 1%. Stopień wysortowania ziaren przeważnie jest umiarkowanie dobry, przy czym znaczny udział mają również utwory o umiarkowanym oraz dobrym stopniu wysortowania. Zdecydowanie mniej liczne są przypadki, gdzie parametr ten odpowiada słabemu wysortowaniu.
8. Utwory eoliczne w głównej mierze są utworami zarówno drobno- jak i bardzo drobnoziarnistymi. Skały bardzo drobnoziarniste zdecydowanie przeważają w facji fluwialnej oraz jeziornej (plaja). Większe średnice (utwory drobnoziarniste) dominują natomiast w przypadku utworów białego spągowca.
9. Utwory eoliczne wykazują przewagę skał o umiarkowanie dobrym stopniu wysortowania, przy czym próbki o dobrym i umiarkowanym wysortowaniu również występują dość licznie. Utwory fluwialne są przeważnie dobrze bądź umiarkowanie dobrze wysortowane, co jest zjawiskiem zbliżonym do utworów białego spągowca. Skały powstałe w środowisku jeziornym wykazują największy wśród przebadanych próbek udział ziaren umiarkowanie dobrze wysortowanych.
10. Na podstawie korelacji wyników pomiarów granulometrycznych i petrograficznych można wyciągnąć wnioski, że w obrębie badanych utworów zachodzą zauważalne relacje, np. wraz ze wzrostem zawartości matriks ilasto-żelazistej oraz spadkiem wielkości ziaren udział kwarcu maleje; porowatość rośnie wraz ze wzrostem zawartości kwarcu; udział matriks rośnie wraz ze zmniejszaniem się średniej średnicy; zawartość skaleni jest powiązana z udziałem litoklastów; wzrost zawartości węglanów powoduje spadek porowatości.

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2016, nr 7, s. 502–512, DOI: 10.18668/NG.2016.07.02

Artykuł nadesłano do Redakcji 2.02.2016 r. Zatwierdzono do druku 12.04.2016 r.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Warunki oraz możliwości występowania niekonwencjonalnych złóż gazu ziemnego zamkniętego w piaskowcach polskiego basenu czerwonego spągowca* – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW; nr zlecenia: 0088/SG/2015, nr archiwalny: DK-4100-89/15.

## Literatura

- [1] Amthor J. E., Okkerman J.: *Influence of early diagenesis on reservoir quality of Rotliegende sandstones, northern Netherlands*. AAPG Bulletin 1998, vol. 82, nr 12, s. 2246–2265.
- [2] Biernacka J., Leśniak G., Buniak A.: *Wpływ kompacji i cementacji na właściwości zbiornikowe piaskowców eolicznych czerwonego spągowca z obszaru monokliny przedsudeckiej*. Prace IGNiG 2006, vol. 134, s. 1–67.
- [3] Buniak A., Mikołajewski Z.: *Środowiska depozycyjne, petrografia*

- i diagenеза осадów czerwonego spągowca w rejonie Poznania*. Geologos 1997, vol. 2, s. 201–214.
- [4] Darlak B., Kowalska-Włodarczyk M., Kobyłecka A., Leśniak G., Such P.: *Przegląd wyników badań właściwości zbiornikowych i filtracyjnych wybranych skał zbiornikowych basenów młodopaleozoicznych Niżu Polskiego*. Prace Państwowego Instytutu Geologicznego 1998, vol. 165, s. 147–153.
- [5] Deczkowski Z.: *Budowa geologiczna pokrywy permsko-mezozoicznej i jej podłoża we wschodniej części monokliny przedsudeckiej (obszar kalisko-częstochowski)*. Prace Instytutu Geologicznego 1977, vol. 82, s. 1–63.
- [6] Folk R. L., Ward W. C.: *Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters*. Journal of Sedimentary Petrology 1957, vol. 27, s. 3–26.
- [7] Gaupp R., Matter A., Platt J., Ramseyer K., Walzebeck J.: *Diagenesis and fluid evolution of deeply buried Permian (Rotliegend) gas reservoirs, Northwest Germany*. AAPG Bulletin 1993, vol. 77, nr 7, s. 1111–1128.
- [8] Grabowska-Olszewska B.: *Mikrostruktury skał górnego czerwonego spągowca rejonu Bogdaj–Uciechów (monoklina przedsudecka) badane za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego (EMS)*. Biuletyn Geologiczny 1974, vol. 17, s. 57–72.
- [9] Grabowska-Olszewska B., Chlebowski R., Kozłowski K., Kulesza-Wiewióra K., Myślińska E.: *Litologia skał górnego czerwonego spągowca rejonu Bogdaj–Uciechów (monoklina przedsudecka)*. Biuletyn Geologiczny 1974, vol. 17, s. 5–55.
- [10] Gregosiewicz Z., Protas A.: *Facje, diagenеза a właściwości zbiornikowe piaskowców czerwonego spągowca rejonu złoża Radlin*. Nafta-Gaz 1997, nr 9, s. 375–387.
- [11] Karnkowski P. H.: *Origin and evolution of the Polish Rotliegend Basin*. Polish Geological Institute Special Papers 1999, vol. 3, s. 3–93.
- [12] Kiersnowski H.: *Architektura depozycyjna basenu czerwonego spągowca w Polsce*. [W:] *Analiza basenów sedymentacyjnych Niżu Polskiego*. Prace Państwowego Instytutu Geologicznego 1998, vol. 165, s. 113–128.
- [13] Kuberska M.: *Diagenеза осадów czerwonego spągowca w strefie Szczecinek–Bydgoszcz (Pomorze Zachodnie)*. Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego 2004, vol. 411, s. 87–168.
- [14] Kuberska M.: *Spojwa węglanowe skał klastycznych czerwonego spągowca w kujawsko-pomorskim segmencie strefy T-T*. Przegląd Geologiczny 1999, vol. 47, nr 2, s. 159–162.
- [15] Kuberska M., Maliszewska A., Grotek I.: *Diagenеза a rozwój przestrzeni porowej w piaskowcach górnego czerwonego spągowca Pomorza Zachodniego*. Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego 2008, vol. 430, s. 43–64.
- [16] Kwolek K., Buniak A.: *Charakterystyka geologiczna i potencjał akumulacyjny utworów górnego czerwonego spągowca w rejonie Poznań–Ostrów Wlkp.* [W:] *Basen permski Niżu Polskiego. Czerwony Spągowiec. Budowa i potencjał zasobowy*. Materiały z konferencji 2004, Piła, s. 47–60.
- [17] Lanson B., Beaufort D., Berger G., Baradat J., Lacharpagne J.C.: *Illitization of diagenetic kaolinite-to-dickite conversion series: late-stage diagenesis of the Lower Permian Rotliegend sandstone reservoir, offshore of the Netherlands*. Journal of Sedimentary Research 1996, vol. 66, nr 3, s. 501–518.
- [18] Lorenc S., Muszyński A., Protas A., Ziółkowska M.: *Litogenеза осадów czerwonego spągowca podłoża Wielkopolski*. [W:] *Przewodnik 62. Zjazdu Polskiego Towarzystwa Geologicznego 1991*, s. 127–128.
- [19] Lundegard P. D.: *Sandstone porosity loss – A „big picture” view of the importance of compaction*. Journal of Sedimentary Petrology 1992, vol. 62, nr 2, s. 250–260.
- [20] Maliszewska A.: *K/Ar age of the fibrous illite of Rotliegend sandstone in Wielkopolska region*. [W:] *IV Ogólnopolska Sesja Naukowa „Datowanie Mineralów i Skał”*. Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej. Lublin 1997, s. 50–55.
- [21] Maliszewska A.: *O znaczeniu badań izotopowych diagenetycznego illitu z piaskowców czerwonego spągowca*. Przegląd Geologiczny 1999, vol. 47, s. 476.
- [22] Maliszewska A., Kiersnowski H., Kuberska M., Kozłowska A., Sikorska M., Jarmołowicz-Szulc K.: *Litofacje i właściwości zbiornikowe piaskowców czerwonego spągowca górnego na obszarze monokliny przedsudeckiej*. Opracowanie archiwalne. CAG Państwowy Instytut Geologiczny. Warszawa 2008.
- [23] Maliszewska A., Kuberska M.: *Cementacja piaskowców czerwonego spągowca a ich porowatość i przepuszczalność*. Nafta-Gaz 1996, vol. 52, nr 9, s. 365–373.
- [24] Maliszewska A., Kuberska M., Such P., Leśniak G.: *Ewolucja przestrzeni porowej utworów czerwonego spągowca*. Prace Państwowego Instytutu Geologicznego 1998, vol. 165, s. 171–184.
- [25] Maliszewska A., Kuberska M.: *Rozwój diagenезы осадów górnego czerwonego spągowca z otworów Objezierze IG1, Września IG1, Zakrzyń IG1*. [W:] *Nowa strategia i perspektywy poszukiwań złóż gazu ziemnego w osadach czerwonego spągowca*. Projekt celowy 40 Departamentu Badań Naukowych Ministerstwa Edukacji i Nauki. Archiwum AGH. Kraków 2005.
- [26] McNeil B., Shaw H. F., Rankin A. H.: *The timing of cementation in the Rotliegend sandstones of the Southern North Sea: A petrological and fluid inclusion study of cements*. Journal of Petroleum Geology 1998, vol. 21, nr 3, s. 311–327.
- [27] Michalik M.: *Diagenesis of the Weissliegend sandstones in the south-western margin of the Polish Rotliegend Basin*. Prace Mineralogiczne 2001, vol. 91, s. 1–176.
- [28] Papiernik B., Górecki W., Pasternacki A.: *Wstępne wyniki modelowań przestrzennych (3D) parametrów petrofizycznych skał podczas poszukiwań stref występowania gazu zamkniętego w polskim basenie czerwonego spągowca*. Przegląd Geologiczny 2010, vol. 58, nr 4, s. 352–364.
- [29] Pokorski J.: *Perspektywy występowania złóż gazu ziemnego w utworach czerwonego spągowca*. Prace Państwowego Instytutu Geologicznego 1998, vol. 165, s. 293–298.
- [30] Rochewicz A.: *Wpływ procesów illityzacji i chlorytazyacji na własności zbiornikowe piaskowców czerwonego spągowca SW Polski*. Archiwum Mineralogiczne 1980, vol. 36, nr 2, s. 55–64.
- [31] Such P.: *Model fizyczny przestrzeni filtracji basenu czerwonego spągowca*. Prace Instytutu Górnictwa Naftowego i Gazownictwa 1996, nr 88, s. 1–82.
- [32] Udden J. A.: *Mechanical composition of clastic sediments*. Bulletin of the Geological Society of America 1914, vol. 25, s. 655–744.
- [33] Wentworth C. K.: *A scale of grade and class terms for clastic sediments*. Journal of Geology 1922, vol. 30, s. 377–392.
- [34] Wolnowski T.: *Prognoza zasobności czerwonego spągowca w basenie permskim Niżu Polskiego w świetle nowych technik poszukiwawczych*. [W:] *Basen permski Niżu Polskiego. Czerwony Spągowiec. Budowa i potencjał zasobowy*. Materiały z konferencji 2004, Piła, s. 17–30.
- [35] Zwingmann H., Clauer N., Gaupp R.: *Timing of fluid in a sandstone reservoir of the north German Rotliegend (Permian) by K–Ar dating of related hydrothermal illite*. In: *Dating and duration of fluid flow and fluid rock interaction*. Geological Society Special Publication 1998, vol. 144, s. 91–106.



Mgr Konrad ZIEMIANIN  
Asystent w Zakładzie Geologii i Geochemii.  
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Lubicz 25 A  
31-503 Kraków  
E-mail: konrad.ziemianin@inig.pl