

Urszula Zagórska, Irena Gąsior, Mateusz Orzechowski
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

Ocena możliwości budowy modelu geologiczno-geofizycznego dla utworów czerwonego spągowca z rejonu rowu Grodziska

Artykuł prezentuje sposób wykorzystania laboratoryjnych badań chemicznych i mineralogicznych do modelowania m.in. zailenia czy wskaźnika CEC na podstawie wskazań profilowań jądrowych. Wyniki analiz laboratoryjnych posłużyły do skonstruowania modeli matematycznych pozwalających oszacować własności skał istotne dla oceny parametrów złożowych. Modele zweryfikowano dla rzeczywistych profilowań jądrowych z otworu wiertniczego XY. Uzyskane wysokie współczynniki determinacji (model vs dane laboratoryjne) zachęcają do dalszych prac nad modelami przeznaczonymi dla większego obszaru geologicznego.

Słowa kluczowe: czerwony spągowiec, model matematyczny, zailenie, CEC, skład mineralny, profilowania jądrowe.

The geological-geophysical model for Rotliegend rocks from Grodzisk trough region – evaluation of the possibility of development

The paper presents the application of laboratory analyses (chemical and mineralogical) for the modeling of parameters such as clay content, CEC etc. from nuclear logs. Mathematical models based on laboratory data were developed. These models allow for the estimation of rock properties that are crucial for the assessment of reservoir parameters. Models were verified for nuclear logs of the XY borehole. High determination coefficient of models vs laboratory data were obtained. These results encourage further studies on models suitable for larger geological areas.

Key words: Rotliegend, mathematical model, CEC, clay content, mineral composition, nuclear logs.

Wstęp

Określanie mineralogii przewierczanych formacji skalnych na podstawie profilowań geofizyki wiertniczej jest ważnym zadaniem z punktu widzenia interpretacji potencjału złożowego. Skład mineralny skały determinuje istotne własności petrofizyczne, takie jak: gęstość właściwa, indeks wodorowy (HI) oraz zdolność jonowymienna (CEC), które są niezbędne do obliczenia porowatości (ϕ), nasycenia porów wodą (S_w) i ostatecznie – nasycenia przestrzeni porowej węglowodorami [16].

W niniejszej pracy poddana ocenie została możliwość budowy matematycznego modelu umożliwiającego obliczenie: zailenia, CEC oraz zawartości kwarcu dla wskazań profilowań jądrowych w utworach czerwonego spągowca. Modelowanie wskaźnika CEC jest przydatne przy zastosowaniu modeli Waxmana-Smitsa i Dual Water do obliczenia współ-

czynnika nasycenia wodą dla skał zailonych. Z kolei współczynnik nasycenia jest niezbędny do oszacowania zawartości węglowodorów w danym basenie sedimentacyjnym.

Budowa modelu geologiczno-geofizycznego wymaga badań na możliwie najbardziej reprezentatywnym, dla danej formacji geologicznej, zestawie próbek skalnych. Zestaw taki powinien być wszechstronnie przeanalizowany pod względem chemicznym, mineralogicznym i petrofizycznym, przy zachowaniu dbałości o wykonywanie wszystkich badań na takim samym materiale. Musi istnieć także możliwość przeliczenia wyników tych badań na wartości parametrów mierzalnych metodami geofizycznymi, np. takich jak: HI, SigMa, GR czy Pe. W zależności od zestawu pomiarów geofizycznych, dostępnego w danym rejonie, określamy model bazujący na mniejszej lub większej ilości pa-

rametrów – zmiennych mierzalnych geofizycznie. Większa ilość zmiennych pomiarowych pozwala określić większą ilość składników skały i/lub zwiększyć dokładność wy-

niku interpretacji. Wśród metod matematycznych umożliwiających tworzenie tego typu modeli podstawową jest zastosowana tu analiza regresji.

Rejon badań

Obszar badań leży w części monokliny przedsudeckiej wyróżnianej jako blok Gorzowa [5], na terenie północno-wschodniego obrzeżenia wału wolsztyńskiego. Do analizy wykorzystano skały czerwonego spągowca z dobrze rozpoznanego rejonu występowania złóż gazu ziemnego – rowu Grodziska (rysunek 1).

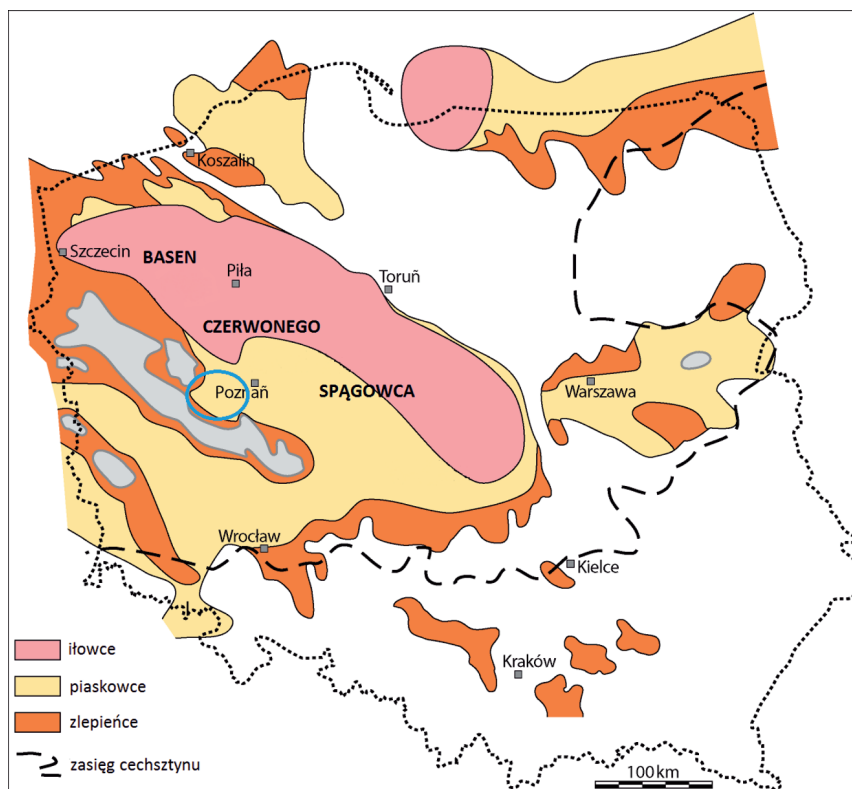
Utwory czerwonego spągowca są skałami deponowanymi w Polskim Basenie Permskim stanowiącym część wielkiego permskiego basenu sedimentacyjnego rozciągającego się od Anglii przez Niemcy, Holandię aż po Polskę. Rozwój basenu rozpoczął się pod koniec karbonu, a sedimentacja w jego obrębie zakończyła się w kredzie wraz z rozpoczęciem procesu wynoszenia tego obszaru. Swoim zasięgiem basen obejmował Waryscydy oraz ich przedgórze i był ograniczony od północnego wschodu przez platformę wschodnioeuropejską [6].

Sedymencja permskich osadów czerwonego spągowca zachodziła w warunkach klimatu podzwrotnikowego suchego z okresowymi opadami. Utwory te należą zasadniczo do systemów depozycji fluwialnej, eolicznej i typu playa. W kształtowaniu sedimentacji czerwonego spągowca, poza warun-

kami klimatycznymi, brały udział także synsedymentacyjne zmiany tektoniczne [8]. Szczegółową analizę sekwencyjną utworów czerwonego spągowca przedstawili Kiersnowski i Buniak [9], wydzielając szereg cykli sedimentacyjnych opracowanych dla poszczególnych części basenu i rekonstruując ewolucję na tle rozwoju tektoniki.

Obecny zasięg występowania utworów czerwonego spągowca na terenie Polski to obszar o podłożu waryscyjskim i częściowo kaledońskim, na którym występują miąższe osady tej formacji o niemal nieprzerwanej ciągłości horyzontalnej oraz kilka mniejszych izolowanych basenów m.in. na obszarze Wielkopolski, Śląska, Małopolski i Pomorza (rysunek 1).

Osady klastyczne (górnego) czerwonego spągowca to jedne z najważniejszych skał zbiornikowych dla złóż węglowodorów w Polsce. Skałami źródłowymi dla węglowodorów zgromadzonych w czerwonym spągowcu są najprawdopodobniej zalegające w jego spągu utwory karbońskie, zaś skałami uszczelniającymi złoża – głównie ewaporaty cechsztynu. Poza złożami konwencjonalnymi w osadach czerwonego spągowca rozwijane są obecnie prace nad poszukiwaniem i eksploatacją złóż typu *tightgas*.



Rys. 1. Zasięg utworów czerwonego spągowca w Polsce (Karnkowski [7], zmienione). Elipsą zaznaczono obszar badań

Metodyka

W celu opracowania modeli wykonano szereg badań laboratoryjnych na archiwalnych próbkach rdzeni wiertniczych z otworu XY. Próbki stanowiły piaskowce barwy szarej lub czerwonej o potencjale zbiornikowym dla złóż węglowodorów. Do wykonanych analiz laboratoryjnych należą: a) oznaczenie składu chemicznego, b) ilościowa analiza składu mineralnego na podstawie dyfrakcji rentgenowskiej (QXRD), c) analiza zdolności jonowymiennej (CEC).

Analizy składu chemicznego (a) zostały przeprowadzone przez laboratoria SGS [14], według wewnętrznych procedur pomiarowych, przy użyciu kilku metod dedykowanych do pomiaru określonego pierwiastka lub grupy pierwiastków. Większość pomiarów wykonano dwiema komplementarnymi metodami: fluorescencji rentgenowskiej z dyspersją długości fali (WDXRF), przeznaczonej do oznaczenia pierwiastków głównych, i spektrometrii mas z plazmą indukcyjnie sprzężoną (ICP-MS), którą stosowano dla pierwiastków śladowych. Niektóre pierwiastki wymagały odrębnej metodyki pomiarowej, właściwej dla jednego z nich. Do oznaczenia chloru stosowano metodę potencjometryczną przy wykorzystaniu elektrody jonoselektywnej, natomiast zawartości węgla i siarki mierzono za pomocą spektroskopii w podczerwieni poprzez całkowite spalanie. Określenie zawartości wody całkowitej zostało wykonane za pomocą metody rurki Penfielda.

Ilościowy skład mineralny (b) skał wyznaczono przy pomocy programu Siroquant opartego na metodzie Rietvelde [13]. Na podstawie zestawu dyfraktogramów rentgenowskich wzorców program umożliwia modelowanie ich mieszanin w odniesieniu do dyfraktogramów eksperymentalnych skał. Pomiarów wykonano w Zakładzie Geofizyki Wiertniczej INiG – PIB na dyfraktometrze X'Pert Pro (Panalytical) [11].

Pojemność jonowymienna CEC (c) to ilość jonów w próbce zdolnych do wymiany na jony kompleksowe barwnika obecnego w roztworze wodnym. Wskaźnik ten jest zależny głównie od typu i ilości minerałów ilastych obecnych w próbkach. CEC wyznaczany jest metodą opierającą się na adsorpcji barwnika przez próbkę z roztworu o znanej koncentracji i kolorymetrycznym oznaczaniu pozostałej jego ilości w roztworze. Do pomiarów absorpcji, przeliczanej dalej na koncentrację barwnika, użyto spektrofotometru UV/VIS Marcel (pomiarów przeprowadzono w Zakładzie Geofizyki Wiertniczej INiG – PIB) [12].

Do obliczeń wykorzystano również archiwalne dane z pomiarów gęstości właściwej i objętościowej oraz ich przeliczenie na porowatość. Badania te były wykonane przy pomocy zestawu piknometrów firmy Micrometrics: AccuPyc i Geopyc.

Analiza wyników

Na podstawie uzyskanych wyników składu chemicznego i mineralnego oraz pojemności jonowymiennej próbek skał z otworu wiertniczego XY obliczono dodatkowe parametry charakteryzujące badane skały. Należą do nich: indeks absorpcji fotoelektrycznej (Pe), przekrój czynny absorpcji neutronów (SigMa) oraz ekwiwalent naturalnej promieniotwórczości (GR).

Wartość indeksu absorpcji fotoelektrycznej zależy od absorpcji niskoenergetycznego promieniowania gamma w przewiercanych formacjach skalnych. Pe uzyskano poprzez przeliczenie składu chemicznego próbek, korzystając ze skorygowanego programu Excel [15], przygotowanego na podstawie teorii opisanej przez Bertozziego, Ellisa i Wahla [1].

Przekrój czynny absorpcji neutronów SigMa jest uzależniony głównie od zawartości pierwiastków takich jak bor, gadolin i chlor. Stosowane w geofizyce makroskopowe przekroje czynne (μ lub Σ) można interpretować jako prawdopodobieństwo zajścia oddziaływania jądrowego na jednostkę drogi promieniowania i są one wyrażane w cm^{-1} [4]. Przekrój czynny absorpcji SigMa można wyliczyć na podstawie analiz chemicznych, tj. zawartości w próbkach zestawu pier-

wiastków, które mają istotny udział w przekroju czynnym absorpcji neutronów. Obliczenia przekroju czynnego wykonano przy użyciu programu SIGSA [3] i wyrażono w jednostkach cu (ang. *capture unit*; $1\ cu = 0,001\ \text{cm}^{-1}$).

GR jest odpowiednikiem sumy naturalnej promieniotwórczości mierzonej w otworze wiertniczym za pomocą sondy gamma i wyrażane jest w jednostkach API. Na podstawie danych laboratoryjnych GR wyliczono, wykorzystując wzór empiryczny używany w kalibracji danych geofizyki wiertniczej [10]. We wzorze stosuje się ważoną sumę zawartości potasu uranu i toru według współczynników wyznaczanych w wyniku pomiarów na stanowisku do kalibracji sond Geofizyki Kraków SA. Wynik przeliczenia wyrażony jest w jednostkach API.

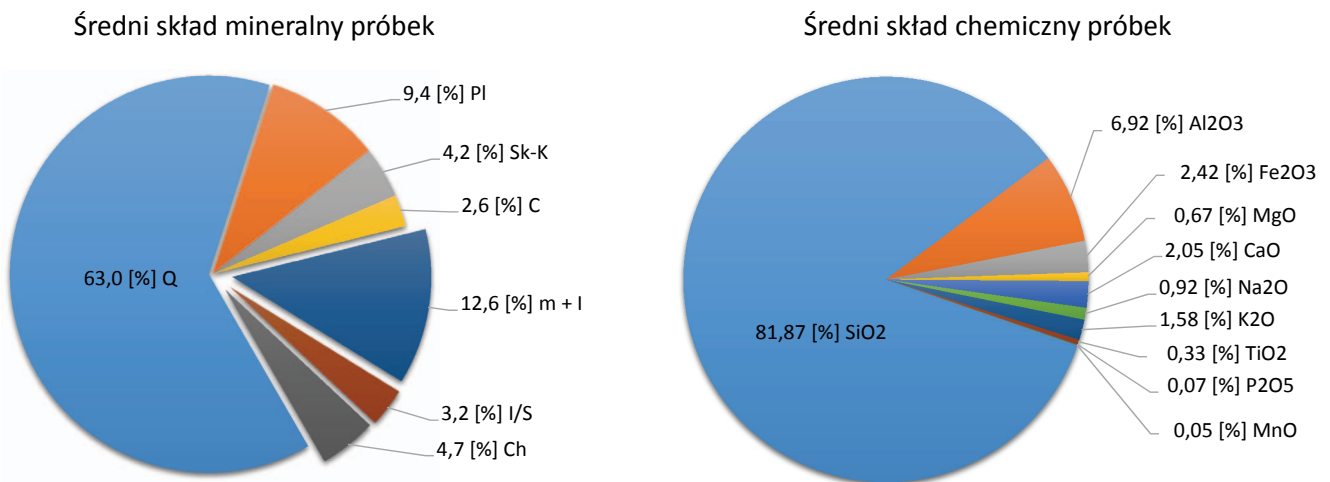
Skład chemiczny i mineralny oraz wyżej wspomniane parametry zostały poddane analizie statystycznej. Na rysunku 2 przedstawiono średnie zawartości głównych pierwiastków oraz minerałów w badanych próbkach. W tabelicy 1 zamieszczono także zakres zmian, średnią, medianę, a także odchylenie standardowe parametrów CEC, Pe , GR i SigMa wraz z głównymi składnikami mineralnymi. Na podstawie tej ana-

lize można scharakteryzować badane skały jako piaskowce o spoiwie ilastym, w którym dominują muskowit i illit. W próbkach, poza kwarcem i minerałami ilastymi, znaczący udział mają skalenie, głównie plagioklasy. Występują też niewielkie ilości kalcytu, a w niektórych próbkach także hematyt. Spośród badanych próbek tylko jedna zawiera anhydryt (4%), co odróżnia ją od pozostałych. Skład mineralny znajduje swoje odzwierciedlenie w składzie chemicznym.

Wskaźnik wymiany jonowej CEC jest niski i świadczy o niewielkiej zawartości minerałów ilastych z grupy smektytu decydujących o wysokim potencjale jonowymiennym.

Tablica 1. Analiza statystyczna składu mineralnego i wybranych parametrów (CEC, GR, P_e , SigMa) dla badanych próbek z otworu wiertniczego XY

Parametr	Zakres zmian		Średnia	Mediana	Odchylenie standardowe
	od	do			
Q [%]	49,70	65,30	58,10	58,50	3,60
Sk [%]	9,60	18,30	12,50	11,80	2,60
Węglany [%]	0,60	4,20	2,40	2,50	1,00
Sił [%]	13,00	25,20	18,90	19,10	3,00
CEC [%]	2,00	6,00	3,20	3,00	1,00
GR [API]	30,40	68,90	46,60	45,50	10,00
P_e [b/e]	2,60	3,30	2,80	2,70	0,20
SigMa [cu]	11,40	16,97	13,95	14,04	1,51



Rys. 2. Średni skład chemiczny i mineralny próbek z otworu wiertniczego XY

Modele matematyczne

Na podstawie szczegółowej analizy składu chemicznego i mineralnego próbek rdzeni wiertniczych oraz opisanych powyżej parametrów zostały opracowane modele matematyczne. Pozwalają one powiązać wielkości mierzone sondami geofizycznymi w odwiercie z parametrami wyznaczonymi laboratoryjnie na rdzeniach wiertniczych (np. skład chemiczny, mineralny, CEC, SigMa itd.). Podstawowym narzędziem konstrukcji modeli jest statystyczna analiza regresyjna. W niniejszej pracy do utworzenia modeli wykorzystano regresję liniową: prostą ($Y = f(X)$) i wielokrotną ($Y = f(X_1 \dots X_k)$), które umożliwiają wyznaczenie potrzebnego składnika/wskaźnika na podstawie odpowiednio: jednego lub kilku innych parametrów.

W wyniku regresji prostej uzyskano wiele zależności o wysokich współczynnikach korelacji R , które przedstawiono w formie macierzy (tablica 2). Warto zwrócić uwagę

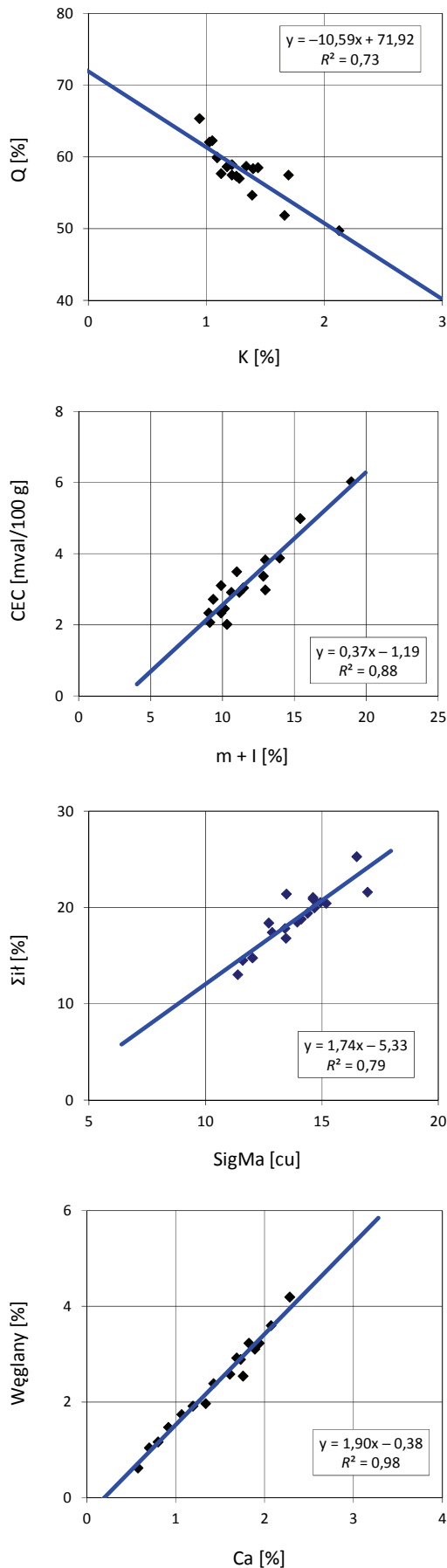
na dużą ilość zależności o wysokim współczynniku R związanych z zaileniem. Wiele z tych zależności wynika z relacji pomiędzy składem chemicznym i mineralnym. Przykłady przedstawiono w tablicy 3 oraz na rysunku 3.

Kolejnym etapem modelowania było wykorzystanie regresji wielokrotnej, która wykazuje istnienie bardziej złożonych relacji pomiędzy kilkoma parametrami. Wyniki przeprowadzonych obliczeń względem badań laboratoryjnych przedstawiono w tablicy 4. Zamieszczono tam parametry prostej regresji liniowej (a , b) oraz współczynniki determinacji i korelacji. Zaprezentowano również przykładowe wykresy korelacyjne.

Modele opracowane metodą regresji wielokrotnej charakteryzują wysokie współczynniki korelacji R z zakresu od 0,85 do 0,99.

Tablica 2. Macierz współczynników korelacji dla badanych parametrów w otworze XY

	Si	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	Ti	Gd	Dy	H ₂ O	Th	U	Q	PI	Sk-K	SK	Węgl.	m + I	I/S	Ch	Σil	CEC	GR	Pe	Sig-Ma
Si	1,00																									
Al	-0,80	1,00																								
Fe	-0,14	-0,03	1,00																							
Mg	-0,81	0,94	0,06	1,00																						
Ca	-0,01	-0,50	0,15	-0,51	1,00																					
Na	-0,58	0,83	-0,43	0,75	-0,46	1,00																				
K	-0,80	0,97	-0,06	0,92	-0,49	0,74	1,00																			
Ti	-0,77	0,91	0,18	0,88	-0,40	0,70	0,86	1,00																		
Gd	-0,60	0,69	-0,09	0,59	-0,14	0,68	0,57	0,66	1,00																	
Dy	-0,64	0,71	-0,13	0,60	-0,11	0,71	0,59	0,66	0,99	1,00																
H ₂ O	-0,80	0,90	0,10	0,90	-0,43	0,65	0,90	0,82	0,53	0,57	1,00															
Th	-0,54	0,68	0,19	0,56	-0,32	0,48	0,58	0,74	0,84	0,82	0,57	1,00														
U	-0,38	0,44	0,32	0,47	-0,44	0,25	0,38	0,46	0,44	0,45	0,47	0,69	1,00													
Q	0,77	-0,87	-0,13	-0,78	0,29	-0,65	-0,85	-0,80	-0,61	-0,64	-0,77	-0,67	-0,55	1,00												
PI	-0,65	0,87	-0,42	0,80	-0,44	0,98	0,81	0,74	0,68	0,71	0,72	0,48	0,20	-0,65	1,00											
Sk-K	-0,55	0,64	-0,30	0,69	-0,46	0,52	0,72	0,58	0,26	0,28	0,58	0,31	0,28	-0,50	0,60	1,00										
SK	-0,67	0,88	-0,42	0,83	-0,48	0,95	0,85	0,76	0,64	0,66	0,74	0,47	0,23	-0,66	0,98	0,73	1,00									
Węgl.	-0,06	-0,43	0,19	-0,45	0,99	-0,41	-0,44	-0,35	-0,05	-0,03	-0,38	-0,26	-0,42	0,23	-0,38	-0,47	-0,42	1,00								
m + I	-0,81	0,94	-0,07	0,90	-0,32	0,80	0,92	0,83	0,70	0,72	0,85	0,57	0,28	-0,81	0,85	0,61	0,86	-0,25	1,00							
I/S	-0,62	0,61	-0,01	0,71	-0,37	0,39	0,60	0,42	0,43	0,45	0,64	0,39	0,51	-0,43	0,45	0,45	0,49	-0,37	0,59	1,00						
Ch	0,17	-0,27	0,72	-0,14	0,03	-0,60	-0,28	-0,03	-0,23	-0,28	-0,12	0,11	0,38	0,12	-0,56	-0,07	-0,49	0,05	-0,33	-0,11	1,00					
Σil	-0,76	0,86	0,34	0,88	-0,38	0,53	0,81	0,85	0,59	0,58	0,86	0,67	0,56	-0,80	0,61	0,56	0,64	-0,30	0,83	0,67	0,19	1,00				
CEC	-0,86	0,95	-0,05	0,92	-0,37	0,76	0,94	0,82	0,67	0,71	0,93	0,61	0,44	-0,82	0,82	0,61	0,83	-0,33	0,94	0,71	-0,31	0,81	1,00			
GR	-0,74	0,90	0,12	0,83	-0,50	0,65	0,87	0,88	0,75	0,76	0,83	0,89	0,72	-0,87	0,68	0,58	0,70	-0,44	0,79	0,62	-0,02	0,85	0,86	1,00		
Pe	-0,07	0,05	0,52	0,18	-0,20	-0,02	-0,04	0,12	0,18	0,15	0,16	0,24	0,66	-0,08	-0,06	-0,10	-0,07	-0,16	-0,04	0,21	0,50	0,28	0,06	0,23	1,00	
SigMa	-0,74	0,85	0,31	0,81	-0,36	0,63	0,76	0,87	0,81	0,80	0,81	0,87	0,66	-0,80	0,65	0,38	0,64	-0,28	0,79	0,57	0,06	0,89	0,81	0,92	0,40	1,00



Rys. 3. Przykłady zależności uzyskanych przy wykorzystaniu regresji prostej

Tablica 3. Współczynniki prostych regresji liniowej dla badanych utworów w otworze XY ($Y = f(X)$; $Y = a \cdot X + b$; $\text{abs}(R) > 0,75$)^{*}

Zależność	a	b	R ²	R
Σil = f(GR)	0,25	7,24	0,72	0,85
Σil = f(SigMa)	1,74	-5,33	0,79	0,89
Σil = f(Al)	3,56	5,88	0,74	0,86
m + l = f(Al)	3,34	-0,53	0,89	0,94
m + l = f(GR)	0,20	2,36	0,63	0,79
m + l = f(H ₂ O)	6,24	0,05	0,72	0,85
Węglany = f(Ca)	1,90	-0,38	0,98	0,99
Q = f(K)	-10,59	71,92	0,73	-0,85
Q = f(GR)	-0,31	72,51	0,75	-0,87
Q = f(SigMa)	-1,88	84,27	0,64	-0,80
Pl = f(Na)	12,80	0,01	0,95	0,97
SK = f(K)	7,48	2,77	0,72	0,85
SK = f(Al)	3,16	0,98	0,78	0,88
SK = f(Na)	14,54	2,67	0,90	0,95
CEC = f(K)	3,21	-1,13	0,89	0,94
CEC = f(m + l)	0,37	-1,19	0,88	0,94
CEC = f(GR)	0,09	-0,86	0,74	0,86
CEC = f(SigMa)	0,54	-4,33	0,65	0,81
K = f(Al)	0,39	-0,13	0,94	0,97
K = f(m + l)	0,10	0,08	0,84	0,92
Th = f(Gd)	1,10	1,07	0,70	0,84
Th = f(GR)	0,12	-0,84	0,79	0,89
Gd = f(Dy)	1,63	0,26	0,98	0,99

^{*}abs (R) – bezwzględna wartość współczynnika R

Weryfikacja modeli

W oparciu o skonstruowane modele matematyczne wyliczono zawartość zailenia, kwarcu oraz wartości wskaźnika CEC, przy wykorzystaniu profilowań geofizycznych w profilu badanego odwiertu (rysunek 5). Na rysunku tym przedstawiono także wyniki analiz laboratoryjnych w formie punktów.

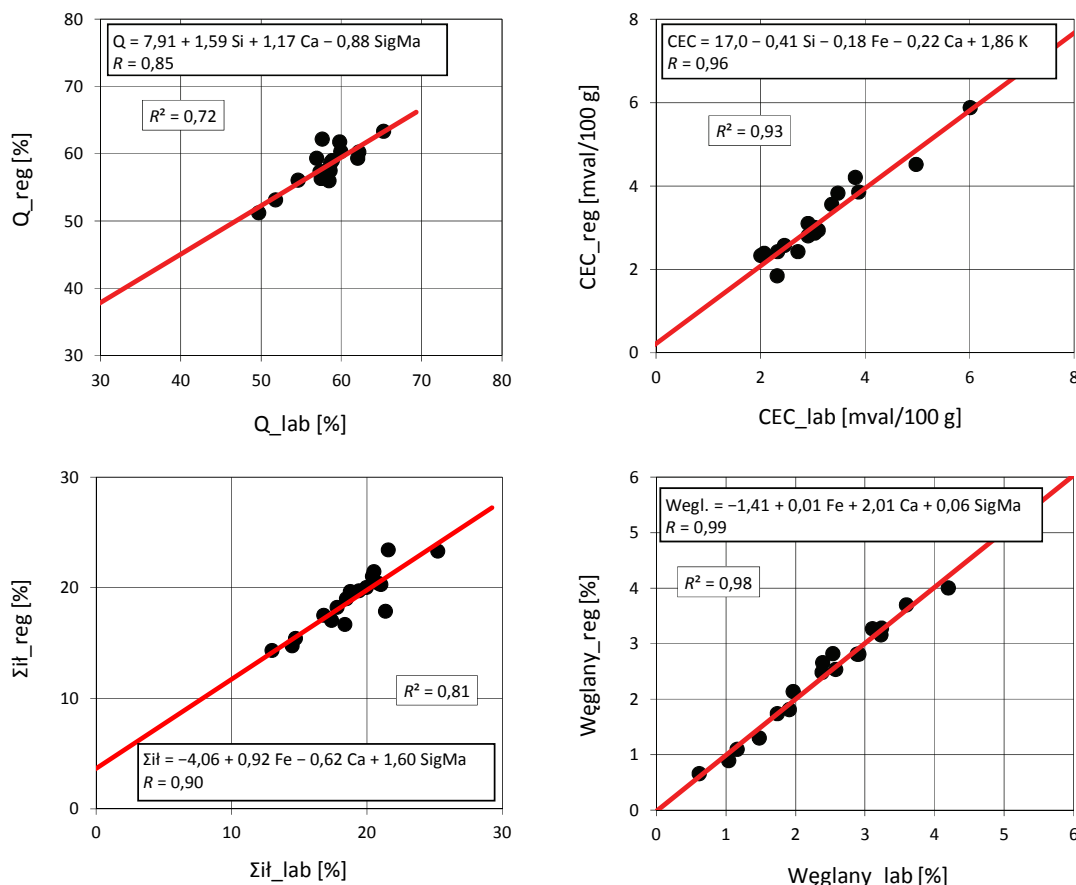
Zawartość poszczególnych kolumn rysunku 5 przedstawia się następująco:

- kolumna 1 – głębokość,
- kolumna 2 – profilowania: gamma GR oraz punktowe wartości GR wyliczone ze wzoru: $GR(API) = f(K, U, Th) = 18,52 \cdot K + 5,46 \cdot U + 3,18 \cdot Th$, na podstawie wyników pomiarów laboratoryjnych: K (%), U (ppm) i Th (ppm),

Tablica 4. Modele matematyczne opracowane przy wykorzystaniu regresji wielokrotnej dla badanych skał z otworu XY ($Y = f(X_1 \dots X_k)$; $Y = a_0 + a_1 \cdot X_1 + \dots + a_k \cdot X_k$); $\text{abs}(R) > 0,75$ *

Model matematyczny		R^2	$\text{abs}(R)$
$Q = f(\text{Si}, \text{Ca}, \text{SigMa})$	$Q = 7,91 + 1,59 \text{ Si} + 1,17 \text{ Ca} - 0,88 \text{ SigMa}$	0,72	0,85
$Q = f(\text{K}, \text{Th}, \text{U})$	$Q = 73,50 - 8,81 \text{ K} - 0,31 \text{ Th} - 1,70 \text{ U}$	0,80	0,89
$\text{CEC} = f(\text{GR}, \text{SigMa})$	$\text{CEC} = -1,41 + 0,08 \text{ GR} + 0,07 \text{ SigMa}$	0,74	0,86
$\text{CEC} = f(\text{Fe}, \text{Ca}, \text{SigMa})$	$\text{CEC} = -3,667 - 0,96 \text{ Fe} + 0,01 \text{ Ca} + 0,61 \text{ SigMa}$	0,75	0,86
$\text{CEC} = f(\text{Si}, \text{Fe}, \text{Ca}, \text{K})$	$\text{CEC} = 17,0 - 0,41 \text{ Si} - 0,18 \text{ Fe} - 0,22 \text{ Ca} + 1,86 \text{ K}$	0,93	0,96
$\Sigma \text{il} = f(\text{GR}, \text{SigMa})$	$\Sigma \text{il} = -3,37 + 0,05 \text{ GR} + 1,43 \text{ SigMa}$	0,80	0,89
$\Sigma \text{il} = f(\text{Fe}, \text{Ca}, \text{SigMa})$	$\Sigma \text{il} = -4,06 + 0,92 \text{ Fe} - 0,62 \text{ Ca} + 1,60 \text{ SigMa}$	0,81	0,90
$\Sigma \text{il} = f(\text{Si}, \text{Al}, \text{K})$	$\Sigma \text{il} = 33,16 - 0,65 \text{ Si} + 4,44 \text{ Al} - 4,30 \text{ K}$	0,76	0,87
Węglany = $f(\text{Si}, \text{Fe}, \text{Ca}, \text{GR})$	Węglany = $-1,51 + 0,01 \text{ Si} + 0,07 \text{ Fe} + 2,02 \text{ Ca} + 0,01 \text{ GR}$	0,98	0,99
Węglany = $f(\text{Fe}, \text{Ca}, \text{SigMa})$	Węglany = $-1,41 + 0,01 \text{ Fe} + 2,01 \text{ Ca} + 0,06 \text{ SigMa}$	0,98	0,99
Węglany = $f(\text{Fe}, \text{Ca})$	Węglany = $-0,63 + 0,11 \text{ Fe} + 1,94 \text{ Ca}$	0,97	0,98

* $\text{abs}(R)$ – bezwzględna wartość R

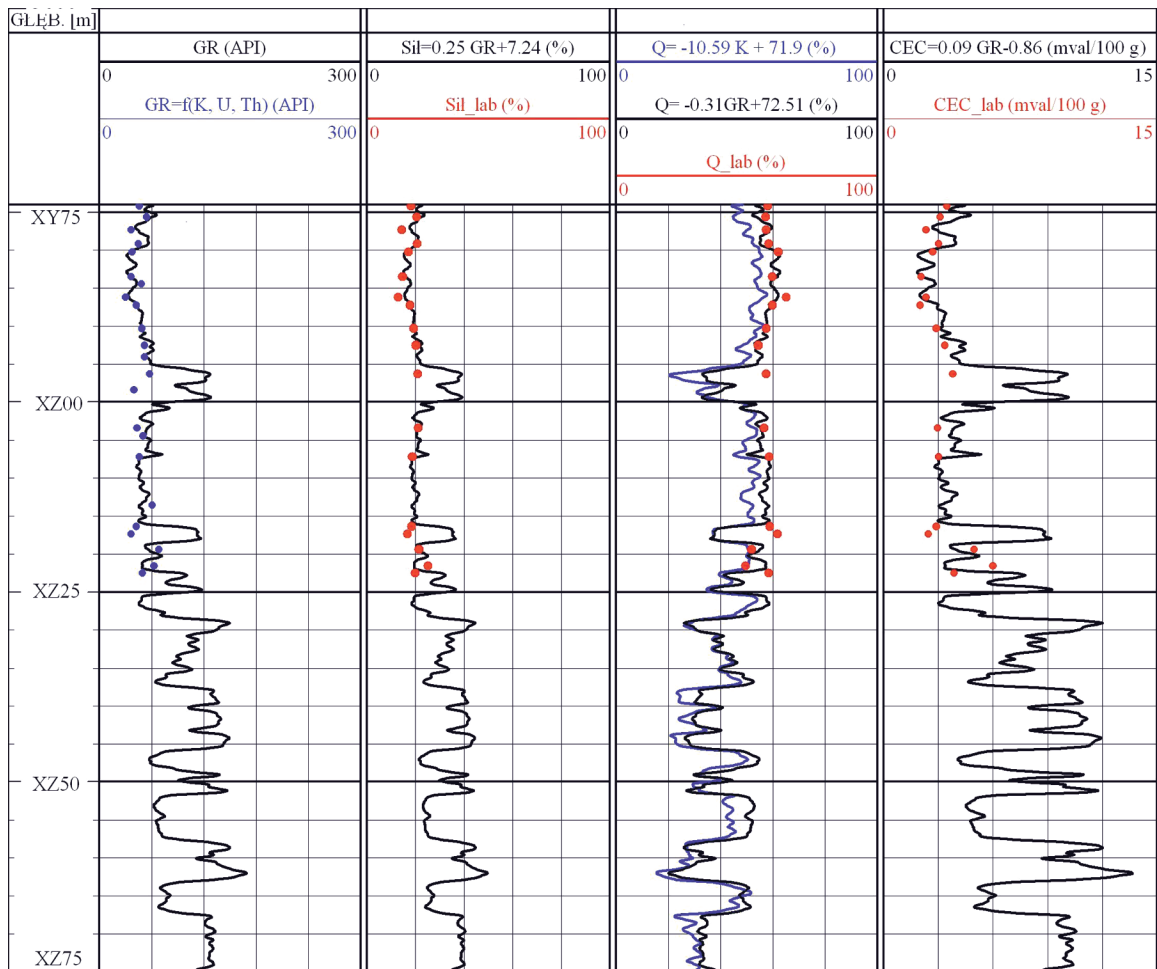


Rys. 4. Korelacja wyników regresji wielokrotnej z danymi laboratoryjnymi

- c) kolumna 3 – zailenie wyliczone z modelu: $\Sigma \text{il} = 0,25 \cdot \text{GR} + 7,24$ oraz zawartość sumy minerałów ilastych z badań laboratoryjnych $\Sigma \text{il}_{\text{lab}}$,
- d) kolumna 4 – zawartość kwarcu określona z modeli: $\text{KWARC} = -0,31 \cdot \text{GR} + 72,51$, $\text{KWARC} = -10,59 \cdot \text{K} + 71,92$ oraz z badań laboratoryjnych $\text{KWARC}_{\text{lab}}$,
- e) kolumna 5 – wskaźnik wymiany kationowej CEC wyliczony z modelu: $\text{CEC} = 0,09 \cdot \text{GR} - 0,86$ oraz z pomiarów laboratoryjnych CEC_{lab} .
- W badanym interwale stwierdzono dobre dopasowanie profilowań wyników uzyskanych z danych karotażowych, przy pomocy modeli i danych laboratoryjnych, za wyjątkiem

kwarcu wyliczonego z modelu $KWARC = -10,59 K + 71,92$. Pojawiające się rozbieżności w pozostałych modelach dotyczą bardziej zailonych poziomów profilu. Wiąże się to z ro-

dzajem dostępnych do badań próbek. Analizowane skały cechują się zbliżonymi wartościami zailenia (średnio około 20%), brak natomiast próbek o podwyższonej zawartości ilów.



Rys. 5. Zestawienie zawartości zailenia, kwarcu i wskaźnika wymiany kationowej CEC obliczonych na podstawie profilowań geofizyki wiertniczej oraz skonstruowanych modeli

Podsumowanie i wnioski

Celem pracy było opracowanie modeli matematycznych umożliwiających szacowanie składu mineralogicznego skał zbiornikowych górnego czerwonego spągowca w rejonie rowu Grodziska. Modele opracowano przy wykorzystaniu analizy regresji prostej i wielokrotnej, na bazie składu chemicznego i mineralnego określonego metodami laboratoryjnymi. Materiał badawczy stanowiły próbki piaskowców czerwonego spągowca z otworu wiertniczego XY.

W wyniku regresji prostej otrzymano dobre współczynniki korelacji dla parametrów opisujących zailenie ($m + I$, Σil , CEC), które można zastosować w oszacowaniu tego ważnego parametru na badanym obszarze. W regresji wielokrotnej uzyskano dobre korelacje modeli z udziałem takich pierwiastków jak Si, Ca i Fe, co można wykorzystać przy stosowaniu profilowania spektrometrycznego neutron-gamma (GEM).

Z przeprowadzonej weryfikacji modeli wynika, że zailenie i parametr CEC dobrze korelują z wynikami uzyskanymi z pomiarów laboratoryjnych w interwale o niższym zaileniu. W celu zbudowania bardziej uniwersalnych modeli należy przeprowadzić analogiczne obliczenia także dla próbek o wyższym udziale ilów.

Model dla zawartości kwarcu obliczonej przy zastosowaniu zależności: $KWARC = -10,59 K + 71,92$ wykazuje słabszą zgodność z danymi laboratoryjnymi. Może to być związane z systematycznym błędem w oznaczeniu potasu sondą SGR stosowaną w tych otworach [2]. Jednocześnie należy zwrócić uwagę na fakt, że modele są adekwatne dla tych interwałów głębokościowych, dla których zakres zmian potasu jest zgodny z dostępnymi danymi laboratoryjnymi.

Przy pobieraniu materiału badawczego istotne jest, aby był on reprezentatywny dla przewierconego profilu litolo-

gicznego otworu. Brak próbek do badań pochodzących z interwałów o podwyższonej zawartości minerałów ilastych nie pozwala na konstruowanie modeli dobrze opisujących cały profil litologiczny. Dopasowanie gęstości opróbowania do zróżnicowania profilu litologicznego może pozwolić na lepsze określenie składu mineralnego skał oraz przybliżenie jego wartości do rzeczywistych, a zatem i budowę bardziej adekwatnych modeli.

Opracowane na bazie danych laboratoryjnych modele matematyczne charakteryzują wysokie współczynniki korelacji, co świadczy o ich poprawności i daje możliwość ekstrapolacji dla skał o zbliżonych parametrach. Zaprezentowane rezultaty niniejszej pracy wykazały, że w oparciu o wyniki pomiarów laboratoryjnych składu chemicznego i mineralnego można skonstruować modele do szacowania składu mineralnego na podstawie geofizyki wiertniczej dla wybranego rejonu.

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2016, nr 11, s. 901–909, DOI: 10.18668/NG.2016.11.02

Artykuł nadesłano do Redakcji 5.07.2016 r. Zatwierdzono do druku 26.10.2016 r.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Ocena możliwości budowy modelu geofizyczno-geologicznego dla utworów czerwonego spągowca* – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW; nr zlecenia: 0066/SW/15, nr archiwalny: DK-4100-0066/15.

Literatura

- [1] Bertozzi W., Ellis D. V., Wahl J. S.: *The physical foundation of formation lithology logging with gamma rays*. Geophysics 1981, vol. 46, nr 10, s. 1439–1455.
- [2] Chojacki S.: *Ocena dokładności interpretacji otworowej spektrometrii naturalnego promieniowania gamma w wybranych rejonach poszukiwań naftowych w Polsce*. Praca magisterska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska 2011.
- [3] Drozdowicz K., Krynicka E.: *Thermal neutron diffusion parameters in homogeneous mixtures*. Report INP No. 1694/PN. Instytut Fizyki Jądrowej, Kraków 1995.
- [4] Jarzyna J., Bała M., Zorski T.: *Metody geofizyki otworowej, pomiary i interpretacja*. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 1999.
- [5] Karnkowski P. H.: *Budowa geologiczna oraz geneza i ewolucja bloku Gorzowa*. Przegląd Geologiczny 2010, vol. 58, nr 8, s. 680–688.
- [6] Karnkowski P. H.: *Origin and evolution of the Polish Rotliegend Basin*. Polish Geological Institute Special Papers 1999, vol. 3, s. 1–93.
- [7] Karnkowski P. H.: *Permian Basin as a main exploration target in Poland*. Przegląd Geologiczny 2007, vol. 55, nr 12/1, s. 1003–1015.
- [8] Kiersnowski H.: *Depositional development of the Polish Upper Rotliegend Basin and evolution of its sediment source areas*. Kwartalnik Geologiczny 1997, vol. 41, nr 4, s. 433–456.
- [9] Kiersnowski H., Buniak A.: *Evolution of the Rotliegend Basin of northwestern Poland*. Kwartalnik Geologiczny 2006, vol. 50, nr 1, s. 119–138.
- [10] Kopeć M., Lenda A., Zorski T.: *Określenie odpowiednika jednostki API dla sond do profilowania naturalnej promieniotwórczości skał*. Geologia, Kwartalnik AGH 1994, t. 20, z. 2, s. 161–167.
- [11] Kowalska S.: *Określanie ilościowego składu mineralnego skał zawierających minerały ilaste metodą Rietvelda*. Nafta-Gaz 2013, nr 12, s. 894–902.
- [12] Przelaskowska A., Klaja J.: *Pomiary pojemności wymiany kationowej (CEC) w badaniach skał osadowych*. Nafta-Gaz 2014, nr 7, s. 432–438.
- [13] Rietveld H. M.: *A Profile Refinement Method for Nuclear and Magnetic Structures*. Journal of Applied Crystallography 1969, vol. 2, s. 65–71.
- [14] SGS Analytical Guide 2015 Web; <http://www.sgs.com/~media/Global/Documents/Brochures/SGS%20Analytical%20Guide%202015%20Web.pdf> (dostęp: wrzesień 2015).
- [15] Zorski T.: *Skoroszyt excel: Pe-exte2004_06.xls*. Niepublikowane materiały dydaktyczne, 2004.
- [16] Zorski T., Ossowski A., Środoń J., Kawiak T.: *Evaluation of mineral composition and petrophysical parameters by the integration of core analysis data and wireline well log data. The Carpathian Foredeep case study*. Clay Minerals 2011, vol. 46, s. 1–21.



Mgr Urszula ZAGÓRSKA
Specjalista inżynierijno-techniczny w Zakładzie Geofizyki Wiertniczej.
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: zagorska@inig.pl



Mgr Irena GAŚSIOR
Starszy specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie Geofizyki Wiertniczej.
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: irena.gasior@inig.pl



Mgr Mateusz ORZECHOWSKI
Specjalista inżynierijno-techniczny w Zakładzie Geofizyki Wiertniczej.
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: mateusz.orzechowski@inig.pl