

Kompleksowa interpretacja profilu otworu obejmującego skały anhydrytowe, węglanowe i mułowcowe wykonana na podstawie badań rdzeni wiertniczych z zastosowaniem metod nieniszczących

Comprehensive interpretation of the borehole profile including anhydrite, carbonate and mudstone rocks based on non-destructive core tests

Rafał Skupio, Benedykt Kubik, Katarzyna Drabik, Anna Przelaskowska

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Niniejsza praca została poświęcona kompleksowej interpretacji interwałów otworu wiertniczego B-7, w przypadku którego dysponowano rdzeniami zbudowanymi z takich skał jak anhydryty, dolomity, węglany oraz mułowce. Do przeprowadzenia badań wykorzystane zostały dane uzyskane na podstawie ciągłych pomiarów rdzeni wiertniczych z zastosowaniem metod tomografii komputerowej (CT), fluorescencji rentgenowskiej (XRF) oraz naturalnej promieniotwórczości gamma (GR) wraz z pomiarem gęstości objętościowej (gamma-gamma). Wymienione metody wchodzą w zakres pomiarów nieniszczących; z wykorzystaniem odpowiednich kalibracji mogą być prowadzone na połówkach rdzeni archiwalnych. Dla uzyskania szczegółowej interpretacji profilowań rdzeni wiertniczych wymagane jest wykonanie laboratoryjnych pomiarów referencyjnych. W przypadku rdzeni z otworu B-7 badania laboratoryjne przeprowadzono na próbkach pobranych z roboczej części rdzenia. Zakres badań stacjonarnych obejmował pomiary składu chemicznego (ICP-MS/OES), mineralnego (XRD), promieniotwórczości naturalnej gamma (K, U, Th), gęstości objętościowej oraz porowatości. Wyniki pomiarów laboratoryjnych posłużyły do sprawdzenia jakości danych oraz do kalibracji ciągłych pomiarów rdzeni w postaci połówek walca (część archiwalna). Na podstawie skalibrowanych danych XRF i badań XRD utworzono modele mineralogiczno-chemiczne dla skał anhydrytowych, węglanowych i mułowcowych, dzięki którym przeprowadzono interpretację litologiczną. Badania gęstości i porowatości posłużyły do kalibracji krzywych gęstości uzyskanych z metody gamma-gamma oraz CT. W ramach kompleksowej interpretacji danych geofizycznych wyniki z ciągłych pomiarów rdzeni zostały porównane z profilowaniami geofizyki wiertniczej oraz z wynikami badań laboratoryjnych. Łącznie przebadano około 28 metrów rdzeni wiertniczych. Ponadto wykonano zestawienie wyników interpretacji litologicznej z pomiarów otworowych, jak i pomiarów na rdzeniach. Końcowe zestawienia zaprezentowano w postaci krzywych wynikowych oraz słupków litologicznych w domenie głębokości. Wybrane interwały rdzeni pozwoliły na przetestowanie stosowanej aparatury oraz metod interpretacji w szerokim zakresie zmienności litologicznej.

Słowa kluczowe: spektrometria XRF, tomografia komputerowa, profilowanie gamma, interpretacja litologiczna, analizy rdzeni wiertniczych.

ABSTRACT: This paper deals with the comprehensive interpretation of the B-7 borehole core intervals, which were composed of rock such as anhydrites, dolomites, carbonates and mudstones. Data obtained on the basis of continuous measurements of cores with the use of computed tomography (CT), X-ray fluorescence (XRF) and natural gamma radioactivity (GR) method with the application of bulk density measurement (gamma-gamma) were used to carry out the study. These methods are included in the scope of non-destructive measurements, and with the use of appropriate calibrations, they can be carried out on the halves of archival cores. For a detailed interpretation of core profiles, laboratory measurements are required for reference values. In the case of cores from the B-7 borehole, laboratory tests were carried out on samples taken from the part of the core intended for research. The scope of stationary tests included the measurements of chemical composition (ICP-MS/OES), mineral composition (XRD), natural gamma radioactivity (K, U, Th), bulk density and porosity. The results of the laboratory measurements were used to check the quality of the data and to calibrate the continuous measurements of the cores in the form of half cylinders (archival part). On the basis of calibrated XRF data and XRD tests, mineralogical and chemical models were created for anhydrite, carbonate and mudstone rocks, with the use of which lithological interpretation was performed. The density and porosity tests were used to calibrate the density profiles obtained from the gamma-gamma and CT methods of the core measurements. As part of the comprehensive interpretation of geophysical data, the results of continuous core measurements results were compared with the well logging and the laboratory tests. About 28 meters of drill cores were tested in total. Furthermore,

Autor do korespondencji: R. Skupio, e-mail: rafal.skupio@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 18.01.2022 r. Zatwierdzono do druku: 22.07.2022 r.

the final summaries are presented in the form of the well and core logs as well as lithological interpretation which was made based on the well logs and the measurements of the cores was presented in the depth domain. The selected core intervals allowed for the testing of the equipment and interpretation methods used in a wide range of lithological variability.

Key words: XRF spectrometry, computed tomography, gamma profiling, lithological interpretation, core analyses.

Wstęp

W ostatnich latach wzrosło zainteresowanie polskiego przemysłu naftowego w zakresie reinterpretacji profilowań geofizyki otworowej. Dane uzyskane na podstawie pomiarów archiwalnych rdzeni wiertniczych umożliwiają prowadzenie tego typu prac uzupełniających. Nowoczesne metody stosowane w Zakładzie Geofizyki Wiertniczej Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego w Krakowie pozwalają na wykonywanie nieniszczących pomiarów całych rdzeni wiertniczych, a na ich podstawie – na dokonywanie reinterpretacji litologicznej w interwałach rdzenia lub całym zakresie otworu z wykorzystaniem pobranych zwiercin. Metody badań dotyczących zakresu geofizyki wiertniczej można podzielić na trzy grupy: pomiary otworowe (krzywe uzyskane z badań prowadzonych sondami w otworach), profilowania rdzeni (ciągłe pomiary rdzeni z zastosowaniem metod nieniszczących), badania laboratoryjne (punktowe pomiary na próbkach pobranych z części roboczej rdzenia). W pracy przedstawiona została metodyka prowadzenia interpretacji i łączenia poszczególnych wyników w komplementarny zestaw danych, umożliwiającą jak najdokładniejsze odwzorowanie badanych warstw skalnych.

Do tej pory w INiG – PIB badania z zastosowaniem kompletu aparatury, w skład której wchodzi spektrometry gamma, gamma-gamma, XRF i tomograf komputerowy, prowadzone były głównie na rdzeniach wiertniczych zbudowanych ze skał piaskowcowych, mułowcowych oraz łupkowych. Do realizacji niniejszej pracy wykorzystano rdzenie pochodzące z otworu B-7, w którym przebadano przejścia litologiczne pomiędzy anhydrytem a węglanami (interwał głębokościowy od 1517 m do 1529 m) oraz wapniem a mułowcem (interwał od 1652 m do 1673 m). Zarówno nazwa otworu wiertniczego, jak i rzeczywiste głębokości poboru rdzeni i próbek skał zostały zatajone.

Pomiary wykonywane na rdzeniach węglanowych i anhydrytowych wymagały wydłużenia czasu rejestracji w metodzie gamma z uwagi na bardzo niski udział pierwiastków promieniotwórczych, zastosowania kalibracji Limestone/Gypsum w aparaturze XRF, wykonania laboratoryjnych badań referencyjnych oraz sprawdzenia poprawności uzyskiwanych wyników poprzez wykresy korelacyjne i śledzenie trendu zmian na krzywych otrzymanych z poszczególnych metod wraz ze zmianą danych punktowych.

Metodyka ciągłych pomiarów rdzeni

Do przeprowadzenia kompleksowej interpretacji odcinków profilu otworu wiertniczego zastosowano wyniki z pomiarów wykonanych takimi metodami jak tomografia komputerowa CT, spektrometria gamma, gamma-gamma oraz spektrometria fluorescencji rentgenowskiej XRF. Badania wykonano według procedur wewnętrznych, opracowanych przez zespół specjalistów z Zakładu Geofizyki Wiertniczej INiG – PIB, z dopasowaniem metodyki do analizowanych typów skał i formy rdzeni. Poniżej przedstawiono skrócony opis stosowanych metod. Ponadto, w celu sprawdzenia jakości profilowań oraz dokalibrowania wyników, przeprowadzono badania laboratoryjne pod kątem promieniotwórczości naturalnej, składu mineralnego, składu chemicznego oraz gęstości objętościowej i porowatości.

Rentgenowska tomografia komputerowa jest nieniszczącą metodą pozwalającą na wizualizację wewnętrznej struktury badanych obiektów. W geologii tego typu badania stosowane są już od około 1974 r. (Dohnalik i Kaczmarczyk, 2019), a obecnie coraz częściej wykorzystuje się je do charakterystyki petrofizycznej skał. Badania tomografii komputerowej (ang. *computed tomography*, CT) zostały wykonane nowoczesnym tomografem rentgenowskim RXCT (ang. *rotating X-Ray computed tomography*) firmy Geotek, zoptymalizowanym do badania skał (Geotek). W skład stanowiska pomiarowego wchodzi: tomograf komputerowy, program Geotek MSCL-XCT 4.0, służący do obsługi tomografu, oraz program Geotek Image Reconstructor, odpowiedzialny za rekonstrukcję danych pomiarowych. Aparat RXCT wyposażony jest w lampę rentgenowską firmy Thermo Kevex X-ray Inc typu PXS10-65W, o maksymalnej mocy 65 W przy napięciu przyspieszającym 130 kV. Urządzenie pozwala na badanie całych rdzeni wiertniczych o średnicy do 15 cm oraz długości do 150 cm. Rozdzielczość otrzymywanych obrazów wynosi od 40 μm do 300 μm . Metoda badawcza polega na zapisywaniu projekcji promieniowania rentgenowskiego badanego obiektu (cyfrowe zdjęcia rentgenowskie) dla kolejnych pozycji kątowych w zakresie 0–360°. Następnie, aby odtworzyć strukturę badanego przedmiotu, obrazy są rekonstruowane. Podczas procesu rekonstrukcji powstaje, poprzez wyliczenie współczynników absorpcji dla każdego punktu badanego przedmiotu, trójwymiarowy obraz w skali odcieni szarości. Oprogramowanie do wizualizacji danych umożliwia generowanie obrazu rdzenia zarówno

w formie zdjęcia 3D, jak i w postaci dowolnie zorientowanych przekrojów oraz obrazów będących rozwinięciem powierzchni bocznej rdzenia. Do prezentacji wyników w postaci przekrojów 2D stosuje się program ImageJ (Fiji), natomiast ilościowa ocena informacji petrofizycznych prowadzona jest z wykorzystaniem oprogramowania MAVI oraz poRose (PoROus materials examination SoftwarE).

Do badań naturalnej promieniotwórczości gamma rdzeni wiertniczych wykorzystano spektrometr gamma logger BGO. Konstrukcja urządzenia wraz z automatycznym systemem przesuwczym umożliwia prowadzenie pomiarów metrowych odcinków rdzeni. Materiał, z którego wykonany jest dwucalowy kryształ, to germanian bizmutu ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ – BGO); cechuje się on zwiększoną gęstością w stosunku do $\text{NaI}(\text{TI})$, co wpływa na polepszenie jego wydajności (Saintgobain). Zastosowany kryształ, dzięki niewielkim rozmiarom, pozwala na uzyskanie zwiększonej rozdzielczości pomiaru w stosunku do sondy otworowej. Zawartości K, U, Th szacowane są na podstawie zarejestrowanego widma, które jest przeliczane w odniesieniu do widm uzyskanych z pomiarów wzorców, odpowiadających kształtowi i średnicy rdzeni (Skupio i Dohnalik, 2015). Oprogramowanie do przeliczania widm zostało dostarczone przez firmę Georadis – zaimplementowany algorytm obliczeniowy wykorzystuje metodę najmniejszych kwadratów (Bartosek, 1977; Georadis). Do obliczeń koncentracji pierwiastków promieniotwórczych wykorzystywane są trzy okna energetyczne w zakresie: 1,33–1,60 MeV dla potasu, 1,64–1,88 MeV dla uranu oraz 2,55–2,69 MeV dla toru. Ustawienia spektrometru pozwalają stosować czas pomiarowy z przedziału 30–600 s. Krok pomiarowy mieści się w zakresie 2–50 cm. Skały z otworu B-7 miejscami cechowały się bardzo niskimi zawartościami pierwiastków promieniotwórczych; ustawiono maksymalny czas pomiarowy wynoszący 10 min dla każdego punktu z krokiem 10 cm. Niemniej jednak w niektórych punktach nie było możliwości zarejestrowania sygnału pochodzącego od rdzeni.

Spektrometr gamma logger BGO jest również wykorzystywany do ciągłych pomiarów gęstości objętościowej rdzeni wiertniczych. Do tego celu stosowane jest dodatkowe źródło w postaci izotopu ^{137}Cs oraz zestaw gęstościowych wzorców kalibracyjnych, odpowiadających układowi geometrycznemu rdzenia. W celu sprawdzenia i ewentualnej dodatkowej kalibracji wykorzystuje się również wyniki gęstościowych badań referencyjnych, które są wykonane za pomocą urządzeń laboratoryjnych. Do oszacowania gęstości rdzeni z pomiarów gamma-gamma stosuje się sumę zliczeń detektora (ang. *counts per minute*, CPM), przeliczoną na g/cm^3 , w odniesieniu do wartości otrzymanych w procesie kalibracji aparatury. Badania wykonywano z krokiem próbkowania 5 cm i czasem pomiaru ustawionym na 2 minuty dla każdego punktu.

Do badań składu chemicznego rdzeni wykorzystano przenośny spektrometr EDXRF (fluorescencja rentgenowska z dyspersją energii) Titan S1 firmy Bruker (Bruker; Skupio, 2014). Aparat został wyposażony w anodę Rh o maksymalnych parametrach: 50 kV, 100 μA , 4 W i detektor 10 mm^2 X-Flash® Silicon Drift Detector (SDD), o typowej rozdzielczości 147 eV dla linii Mn K-alfa. Aparatura przenośna umożliwia wykonywanie pomiarów nieniszczących bezpośrednio na rdzeniach wiertniczych lub odsłonięciach skalnych, bez konieczności pobierania próbek (Ogburn et al., 2012; Rowe et al., 2012). Aparat XRF jest standardowo wykorzystywany do określania składu chemicznego skał, jak również do interpretacji litologicznej i korelacji chemostratygraficznej na podstawie wybranych pierwiastków. Ponadto znalazł zastosowanie w sprawdzaniu dokładności interpretacji dyfraktogramów rentgenowskich podczas określania składu mineralnego skał (Kowalska, 2013). Zakres pomiarowy obejmuje maksymalnie 45 pierwiastków, od magnezu (Mg) do uranu (U). Magnez jest najlżejszym pierwiastkiem możliwym do określenia za pomocą aparatury Titan S1 (Skupio, 2014). Analiza składu chemicznego wykorzystuje metodę pozwalającą na wykonywanie pomiarów bez konieczności stosowania wzorców. Oprogramowanie spektrometru wyposażone zostało w szereg kalibracji, standardowa, o nazwie GeoChem, pozwala na analizę szerokiego zakresu pierwiastków w dwóch fazach pomiarowych – pierwsza faza dotyczy analizy pierwiastków ciężkich, a druga pierwiastków lekkich. Kalibracja ta jest stosowana głównie do skał o matrycy krzemionkowej. Dla skał węglanowych i anhydrytowych przewidziana została kalibracja Limestone i Gypsum; pozwalają one uzyskać dokładniejsze wyniki w zakresie takich pierwiastków jak wapń, magnez czy siarka. Stosując te kalibracje, spektrometr pracuje w jednej fazie i pozwala na analizę jedynie takich związków jak: MgCO_3 , Al_2O_3 , SiO_2 , P_2O_5 , SO_3 , K_2O , CaCO_3 , TiO_2 , MnO , Fe_2O_3 (w kalibracji Gypsum wapń i siarka są mierzone łącznie w postaci CaSO_4), co oznacza brak możliwości detekcji pierwiastków śladowych. W przypadkach, kiedy pierwiastki śladowe są wymagane do określenia w warstwach węglanowych, należy wykonać pomiary na dwóch kalibracjach. Niemniej jednak analizowane związki w pełni wystarczają do przeprowadzenia interpretacji litologicznej na podstawie pomiarów z zastosowaniem kalibracji Limestone/Gypsum.

Standardowe metody kalibracyjne (GeoChem, Limestone, Gypsum) zaimplementowane w spektrometrze przez producenta są odpowiednie dla danego typu skał i danej matrycy, na której były wykonywane badania mające na celu stworzenie oczekiwanej metody. Wyniki badań skał z danego rejonu wymagają dokalibrowania z uwagi na różnice w składzie chemicznym oraz stosowanie własnej procedury przygotowywania prób do badań. Przeprowadzenie poprawnej kalibracji dla każdej z wymienionych metod pozwala zapewnić spójność danych

dotyczących składu chemicznego wykorzystywanych do interpretacji litologicznej. Wyniki profilowań po kalibracji powinny pokrywać się z punktowymi wynikami badań laboratoryjnych (Skupio i Zagórska, 2020), które przeprowadzono w akredytowanym laboratorium Actlabs. Zastosowane laboratoryjne metody badań składu chemicznego to ICP-MS (spektrometria mas sprzężona z plazmą wzbudzaną indukcyjnie) i ICP-OES (atomowa spektrometria emisyjna ze wzbudzeniem w plazmie indukowanej). Metody te wykorzystywane są do jakościowego i ilościowego określania ponad 70 pierwiastków w szerokim zakresie stężeń (Kozak, 2010). W badaniach stosuje się metodę FUS-ICP, składającą się zarówno z ICP-MS, jak i ICP-OES, w której mierzone są preparaty stapiane z zastosowaniem tetraboranu/metaboranu litu dla zapewnienia jednorodności próbek (Lezzerini et al., 2014). Analizy ilościowe wykonuje się zazwyczaj za pomocą metod empirycznych z wykorzystaniem wzorców do kalibracji aparatury stacjonarnej (Wieczorek, 2012; Conrey et al., 2014).

Wyniki badań

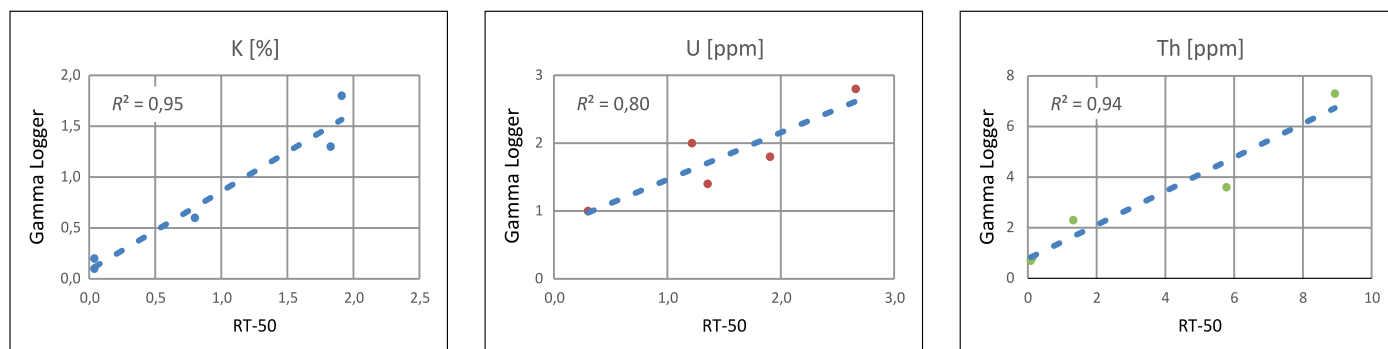
Przeprowadzono szeroki zakres badań otworu B-7, umożliwiając wykonanie kompleksowej interpretacji danych geofizycznych w profilu rdzeni wiertniczych. Badania dotyczyły dwóch interwałów obejmujących anhydryty i dolomity cechsztynu (10 metrów rdzenia) oraz wapienie cechsztynu i mułowce karbonu (18 metrów rdzenia). Rdzeń podzielony był na dobrze zachowaną część archiwalną, na której wykonano badania nieniszczące w postaci ciągłych profilowań, oraz na część roboczą, z której pobrano próbki do referencyjnych badań laboratoryjnych. Skalibrowane wyniki profilowania rdzeni przedstawione zostały w rozdziale poświęconym interpretacji danych. W niniejszym rozdziale zaprezentowano wyniki w postaci wykresów korelacyjnych z wynikami poszczególnych metod. Korelacji poddano punktowe wyniki z pomiarów

laboratoryjnych – z odpowiadającymi im wynikami z pomiarów ciągłych (punkty dopasowane głębokościowo).

Badania laboratoryjne mają za zadanie sprawdzenie poprawności krzywych uzyskanych z pomiarów rdzeni przed przystąpieniem do kompleksowej interpretacji, kalibrację wyników z badań chemicznych XRF oraz profili gęstości i porowatości, jak również wykorzystywane są do tworzenia modeli mineralogiczno-chemicznych na podstawie pomiarów XRF. Przeprowadzone badania laboratoryjne dotyczyły naturalnej promieniotwórczości skał (K, U, Th) – pomiary radiometryczne, pomiarów gęstości objętościowej, porowatości, składu chemicznego oraz składu mineralnego.

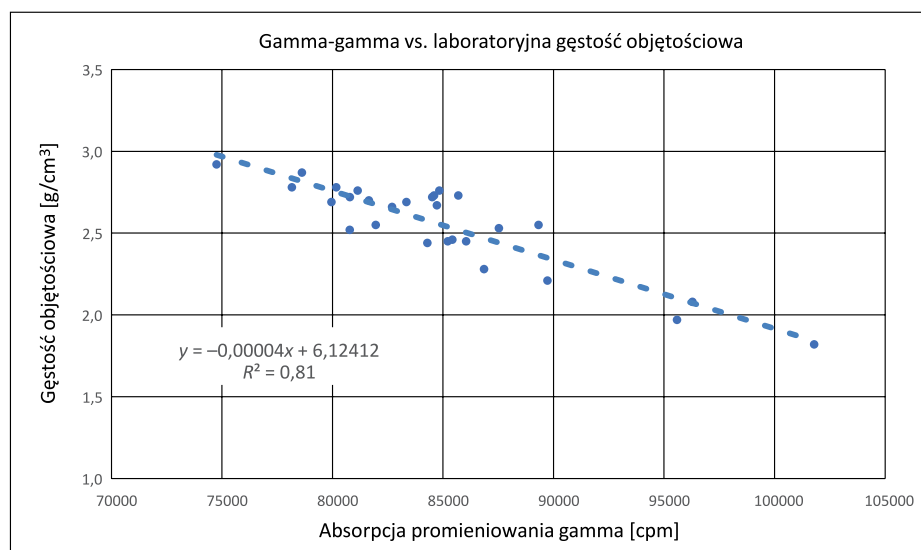
Do analiz radiometrycznych przeznaczono 5 próbek skał pobranych z roboczej części rdzenia. Pomiary przeprowadzono z zastosowaniem stacjonarnej aparatury RT-50, z kalibracją przeznaczoną dla próbek w postaci sypkiej o masie 70 gramów. Do wykonania badań w spektrometrze zastosowano wydłużony czas pomiarowy, wynoszący 6 godzin, z uwagi na niską aktywność pierwiastków promieniotwórczych w badanych skałach. W przypadku pomiarów standardowych czas ten wynosi 3 godziny. Do badań wytypowano zaledwie 5 próbek, niemniej jednak nie było konieczności wykonywania większej liczby pomiarów z powodu odpowiednio przeprowadzonej kalibracji spektrometru gamma logger. Rdzeń z otworu B-7 był mierzony w postaci połówki walca, co wymagało weryfikacji uzyskanych wartości za pomocą dodatkowej metody laboratoryjnej. Wyniki badań laboratoryjnych oraz wyniki pomiarów rdzeni zostały poddane korelacji przedstawionej na rysunku 1. Współczynnik determinacji dla potasu wynosi 0,95, dla uranu: 0,80, natomiast dla toru: 0,94. Wyniki te potwierdzają poprawność działania aparatury gamma logger i umożliwiają wykorzystanie krzywych do interpretacji zailenia w interwale rdzenia, jak również ewentualne wprowadzenie poprawki na zawartość potasu w płuczce wiertniczej.

Do badań gęstości i porowatości przeznaczono 28 próbek skał w postaci rdzeników, które pobrano z roboczej części



Rysunek 1. Wykresy korelacyjne dla wyników pomiarów potasu [%], uranu [ppm] i toru [ppm] z otworu B-7. Badania zostały wykonane aparaturą gamma logger (profilowanie rdzeni) oraz RT-50 (pomiarzy na próbkach pobranych z rdzeni)

Figure 1. Correlation graphs for the results of potassium [%], uranium [ppm] and thorium [ppm] measurements from the B-7 well. The tests were performed with the gamma logger (core measurements) and the RT-50 (measurements on samples taken from the cores)



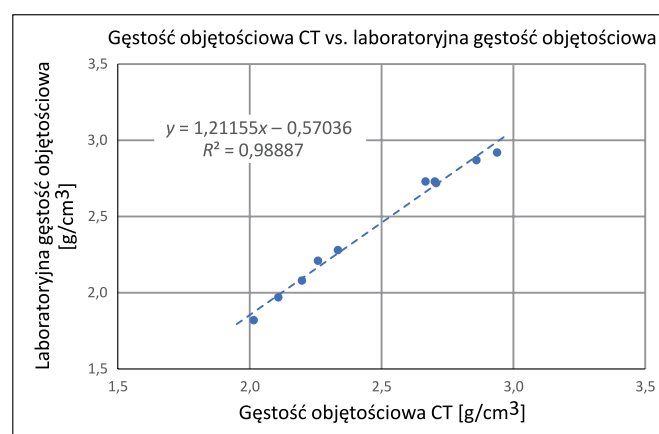
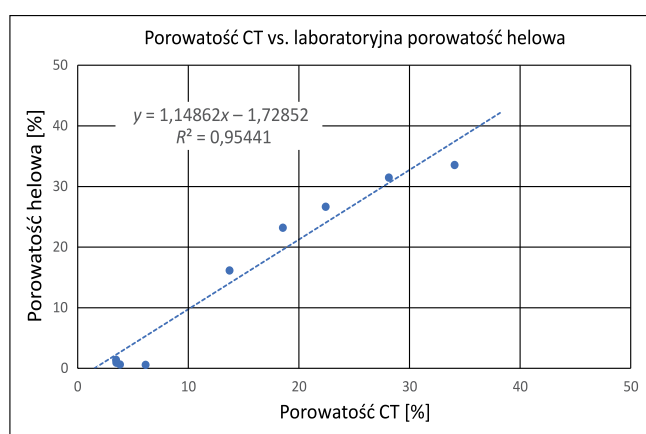
Rysunek 2. Wykres korelacyjny dla gęstości objętościowej [g/cm^3] i absorpcji promieniowania gamma [CPM] uzyskanych z pomiarów próbek pobranych z rdzeni i profilowania całych rdzeni wiertniczych z otworu B-7

Figure 2. A correlation plot showing the bulk density [g/cm^3] and the absorption of gamma radiation [CPM] obtained from the measurements of samples taken from the cores and the profiling of the entire core from the B-7 well

rdzenia. Analizowane skały były zmienne pod względem określanych parametrów oraz zostały w dalszej części wykorzystane do kalibracji krzywych z pomiarów gamma-gamma oraz CT, stąd przeprowadzono znacznie więcej badań niż w przypadku pomiarów radiometrycznych. Na rysunku 2 zestawiono wyniki pomiarów laboratoryjnych gęstości objętościowej [g/cm^3] z wynikami profilowania gamma-gamma całych rdzeni wiertniczych. Współczynnik determinacji R^2 dla tego zestawienia wyniósł 0,81, ponadto wzór z regresji liniowej pozwolił na wykonanie kalibracji krzywych uzyskanych z metody gamma-gamma.

Wyniki profilowania zmian gęstości objętościowej oraz porowatości otrzymane z przetwarzania obrazów tomografii

komputerowej CT [%] zestawiono z wynikami porowatości (rysunek 3A) i gęstości objętościowej (rysunek 3B) uzyskanymi z pomiarów laboratoryjnych. W przypadku porowatości współczynnik R^2 wynosi 0,95; wzór otrzymany z regresji liniowej stosowany jest również do dokalibrowania krzywych CT w celu określenia zmian porowatości dla całego analizowanego profilu rdzenia. Korelacja wyników pomiarów gęstości objętościowej z pomiarów laboratoryjnych z wynikami profilowania CT (rysunek 3B) pozwoliła uzyskać współczynnik determinacji na poziomie 0,99, co również umożliwia wykorzystanie wzorów do kalibracji krzywej zmian gęstości objętościowej otrzymanej z pomiarów CT. W przypadku korelacji danych CT z wynikami badań laboratoryjnych uzyskano mniejszą liczbę



Rysunek 3. Wykresy korelacyjne dla porowatości CT i laboratoryjnej porowatości helowej (A) oraz gęstości objętościowej CT i laboratoryjnej gęstości objętościowej (B) uzyskane z badań porównawczych próbek pobranych z rdzeni oraz całych rdzeni wiertniczych z otworu B-7

Figure 3. Correlation graphs showing CT porosity with helium porosity (A) and CT bulk density with laboratory bulk density (B) obtained from comparative tests of samples taken from cores and whole cores in the B-7 well

danych punktowych. Przyczyniły się do tego braki otrzymane w procesie pomiarów rdzeni i przetwarzania obrazów do formy krzywych z metody CT, ponieważ w części interwałów brakuje ciągłych danych.

Profilowania składu chemicznego skał w otworze B-7 przeprowadzono z zastosowaniem przenośnego spektrometru XRF, wykorzystując takie metody kalibracyjne jak Geochem (piaskowce/mułowce), Limestone (węglany) i Gypsum (anhydryty). Wyniki badań porównawczych, z podziałem na trzy grupy danych w zależności od litologii i dopasowanej kalibracji, przedstawiono na wykresach korelacyjnych (rysunek 4). W przypadku najczęściej używanej metody GeoChem, która pozwala na pomiary największego zakresu pierwiastków, wykorzystano 10 próbek z pomiarów laboratoryjnych, w metodzie Limestone – 7 próbek, natomiast Gypsum – 4 próbki. Na części wykresów występuje mniej punktów niż wykonanych badań, co spowodowane było zbyt niskim limitem detekcji metod pomiarowych. Prezentacja danych została ograniczona do najważniejszych związków, obejmujących: SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , K_2O , MgO , na wykresach zamieszczono wzory uzyskane z regresji liniowej oraz współczynniki determinacji R^2 . Wyniki osobno przedstawiono dla pomiarów metodą GeoChem (lewa kolumna wykresów), a osobno dla połączonych danych z kalibracji Limestone i Gypsum (prawa kolumna wykresów). Dane z dwóch metod kalibracyjnych, które zostały uzyskane w procesie osobnych serii pomiarowych, zestawiono na tych samych wykresach z uwagi na podobieństwo stosowanych metod i ich poziomów dla skał węglanowych i anhydrytowych.

Zestawienia cechują się wysokimi współczynnikami korelacji ze względu na dużą zmienność litologiczną, jednak w przypadku SiO_2 korelacji poddano jedynie 4 punkty pomiarowe (pozostałe wyniki były poniżej progu detekcji). Współczynniki determinacji w przypadku analizowanych tlenków i pierwiastków wykazują bardzo wysoką korelację, R^2 przekracza 0,9, niższa jest jedynie w przypadku CaO dla kalibracji Limestone: 0,87 i Gypsum: 0,78. W przypadku otworu B-7 współczynniki determinacji dla magnezu są bardzo wysokie z uwagi na jego znaczny udział w utworach węglanowych, co pozwala na odpowiednią kalibrację oraz późniejsze zbudowanie modeli obliczeniowych dla dolomitu. We wcześniejszej pracy (Skupio, 2021), w której prezentowane były utwory piaskowcowe, zawartość MgO nie przekraczała kilku procent, a korelacje były na niskim poziomie.

Wzory uzyskane w wyniku przeprowadzonych badań umożliwiają wykonanie kalibracji danych XRF w każdym mierzonym interwale (odmiennej litologii) osobno. To pozwala na pełną integrację danych i stworzenie uniwersalnych krzywych odniesionych do wyników badań laboratoryjnych. Do interpretacji poziomów anhydrytowych zostały wykorzystane wzory z połączenia danych laboratoryjnych z metodą Gypsum,

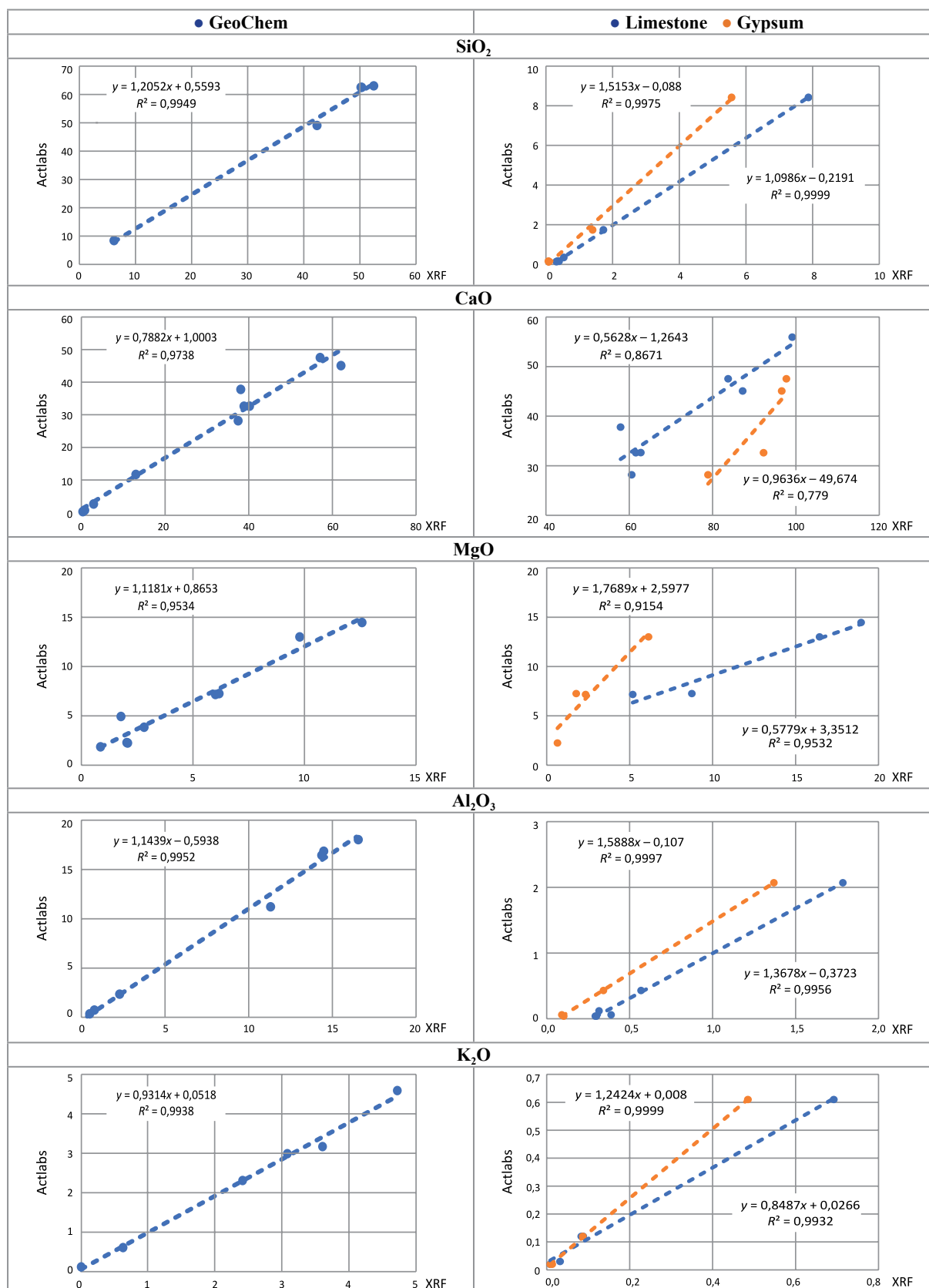
do węglanowych – z metodą Limestone oraz do piaskowców/mułowców – z metodą Geochem.

Wyniki interpretacji litologicznej

Procedura określania profilu litologicznego wykorzystuje wyniki pomiarów składu chemicznego z aparatury XRF oraz modele łączące zawartości wybranych składników chemicznych z zawartością poszczególnych minerałów określonych metodą XRD. W celu wyznaczenia składu mineralnego opracowany został dedykowany model mineralogiczno-chemiczny oparty na korelacjach 30 analiz składu mineralogicznego XRD ze składem chemicznym XRF. Materiał przeznaczony do analiz XRD został pobrany z interwałów reprezentujących pełen zakres typów skał występujących w profilu otworu. Takie podejście pozwoliło osiągnąć wysoki poziom dopasowania pomiarów chemicznych do składu mineralnego. Obliczenia przeprowadzone zostały w programie ProGeo 6.7, który umożliwia tworzenie i wykonywanie skomplikowanych algorytmów interpretacyjnych dostosowanych do standardowych profilowań geofizycznych oraz punktowych danych laboratoryjnych. Do obliczeń wykorzystano algorytm interpretacyjny „Minerals”, napisany w środowisku pakietu ProGeo 6.7, wykorzystujący regresję wielowymiarową określającą zależności pomiędzy pomiarami chemicznymi (XRF) i mineralogicznymi (XRD). Algorytm obliczeniowy umożliwia dostosowanie interpretacji do danego modelu składu mineralnego. Do określenia składu mineralnego wykorzystano następujące tlenki i pierwiastki: SiO_2 , CaO , MgO , Al_2O_3 , K_2O , Fe_2O_3 , S , MnO , TiO_2 .

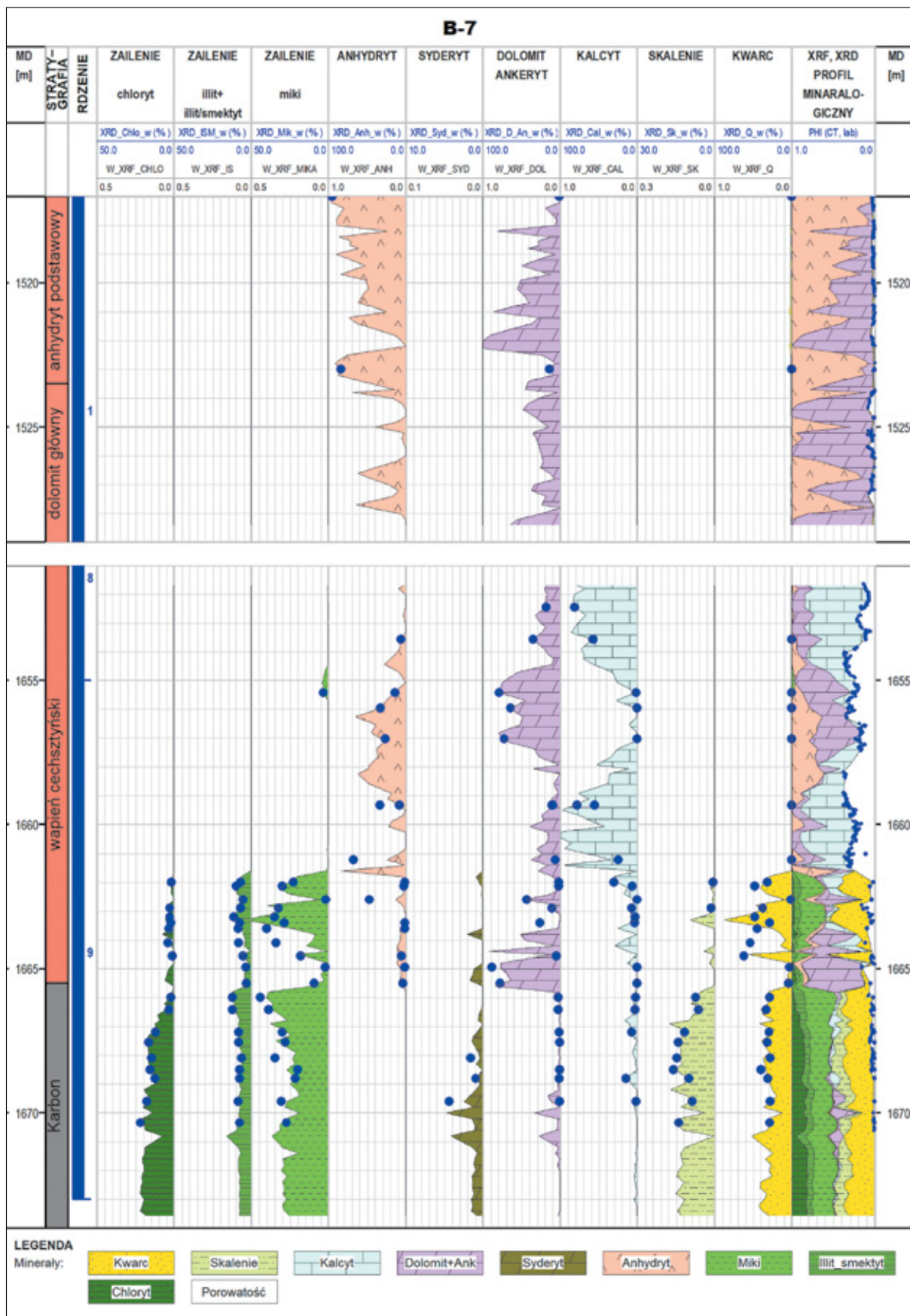
Modele XRF/XRD obliczone zostały na składnikach wyrażonych w formie procentów wagowych, co odpowiada jednostkom bezpośrednio otrzymywanym z wykorzystywanych metod pomiarowych. W kolejnym etapie obliczeń wyznaczone zawartości poszczególnych minerałów zostały przekształcone na procenty objętościowe. Podczas przeliczania zawartości składników mineralnych z procentów wagowych na objętościowe zastosowane zostały gęstości szkieletowe poszczególnych pierwiastków oraz porowatość obliczona na podstawie pomiarów CT.

Analizowana część profilu otworu B-7 w interwale od 1517 m do 1529 m reprezentowana jest przez anhydryty i dolomity (anhydryt podstawowy i dolomit główny); w tym interwale model obejmował takie minerały jak kwarc, dolomit i anhydryt. W części węglanowej wapienia cechsztyńskiego (od 1652 m do 1661 m) określono udział takich minerałów jak kalcyt, dolomit, anhydryt i miki, natomiast w części zlepieńcowej (na głębokości od 1661 m do 1665 m) takie minerały jak kwarc, skalenie, kalcyt, dolomit, syderyt, anhydryt, miki, illit/smektyt, chloryt. Spągowy fragment wapienia cechsztyń-



Rysunek 4. Wykresy korelacyjne dla wybranych tlenków wykorzystywanych do tworzenia modeli mineralogiczno-chemicznych. Korelacje zostały wykonane dla: SiO₂, CaO, MgO, Al₂O₃, K₂O. Na osi pionowej przedstawiono wyniki referencyjne z laboratorium Actlabs, na osi poziomej – wyniki z przenośnego spektrometru XRF zmierzone z zastosowaniem kalibracji GeoChem (kolumna lewa), Limestone oraz Gypsum (kolumna prawa)

Figure 4. Correlation graphs for selected oxides that are used to create mineralogical-chemical models. Correlations were made for: SiO₂, CaO, MgO, Al₂O₃, K₂O. The vertical axis shows the reference results from the Actlabs laboratory, and the horizontal axis shows the results from the portable XRF spectrometer measured using GeoChem calibrations (left column), Limestone and Gypsum (right column)



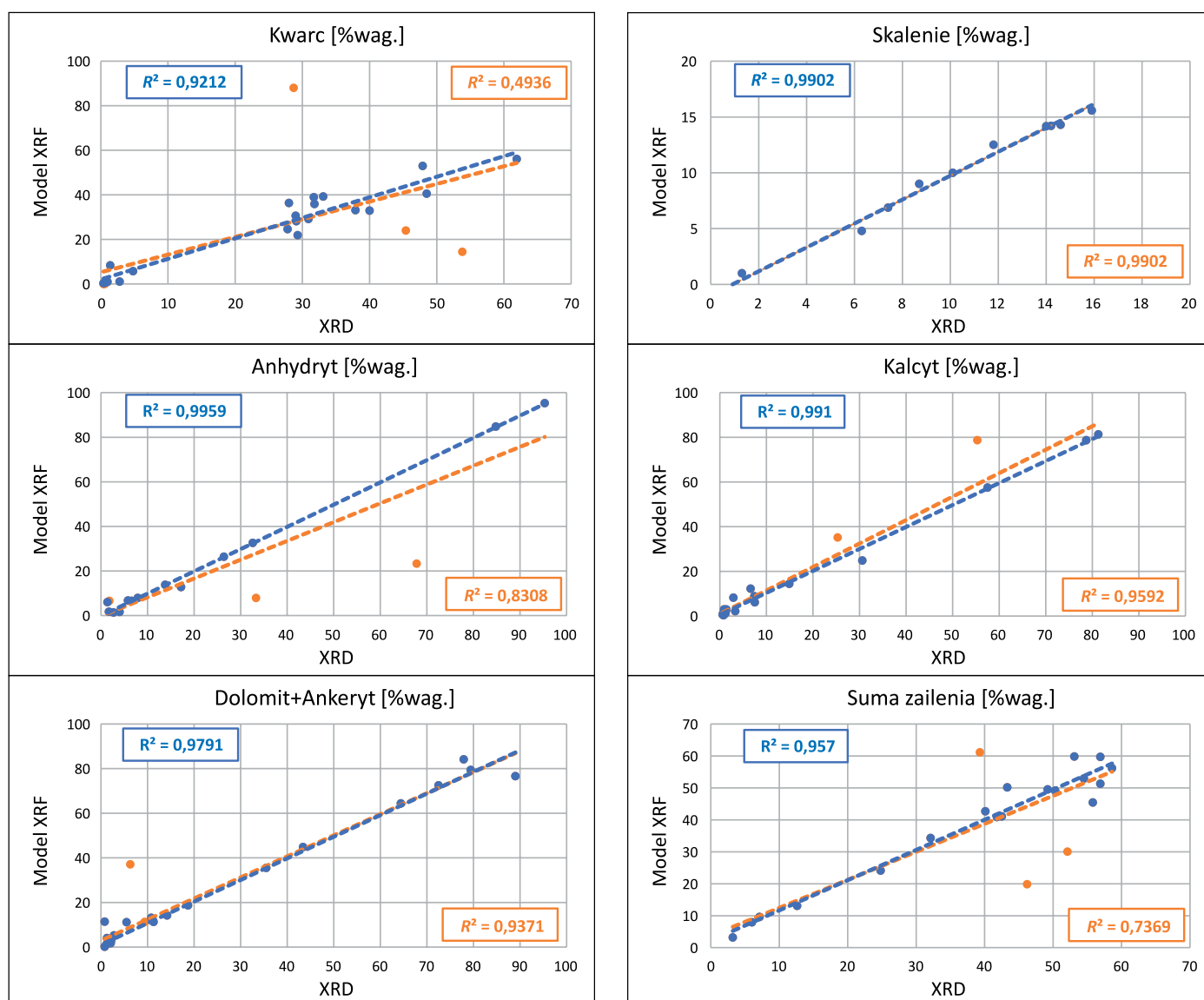
Rysunek 5. Profile składu mineralnego z otworu B-7 wraz z profilem skumulowanym. Niebieskie punkty na krzywych odpowiadają wynikom badań laboratoryjnych

Figure 5. Profiles of the mineral composition from the B-7 well, along with the cumulative profile. Blue dots on the curves correspond to the results of laboratory tests

skiego zbudowany jest ze zlepieńców o zmiennym udziale węglanów i minerałów piaszczysto-ilastych. W utworach karbonu wydzielono kwarc, skalenie, kalcyt, dolomit, syderyt, miki, illit/smektyt oraz chloryt.

Sprawdzenie poprawności otrzymanych wyników przeprowadzono na dwa sposoby. Profilowania wynikowe zestawiono z punktowymi pomiarami analiz XRD (rysunek 5) oraz wykonano wykresy korelacyjne dla obliczonych składników mineralnych (rysunek 6). Na wykresach dla wybranych składników zestawiono dane wejściowe w postaci 30 pomiarów referencyjnych XRD z wynikami uzyskanymi w procesie modelowania składu mineralnego na podstawie pomiarów XRF. Na wykresach korelacyjnych przedstawiono zestawienia dla wybranych składników głównych; cechują się one bardzo wysokimi współczynnikami korelacji.

W przypadku trzech analiz XRD pobranych ze zlepieńcowej części wapienia cechsztyńskiego zauważalna jest niezgodność pomiędzy laboratoryjnym składem mineralogicznym (XRD) a pomiarami XRF z obliczonym składem mineralnym. Fakt ten można wytłumaczyć bardzo dużą niejednorodnością składu mineralnego skał w zlepieńcach. Wszystkie wykresy korelacyjne przedstawione są dla dwóch serii danych: serii pomarańczowej – zawierającej pełny zakres pomiarów (niskie współczynniki R^2) oraz serii niebieskiej – z pominięciem próbek odstających. Analizując przedstawione wykresy (rysunek 6), można zauważyć, że – szczególnie w przypadku kwarcu – wyniki obliczeń składu mineralnego na podstawie pomiarów XRF dla trzech próbek pobranych ze zlepieńców nie są zgodne z wynikami analiz XRD. Współczynnik korelacji R^2 obliczony bez uwzględnienia tych danych wynosi 0,92, a po



Rysunek 6. Wykresy korelacyjne wyników modelowania składu mineralnego określonego na podstawie składu chemicznego z wynikami pomiarów laboratoryjnych XRD dla wybranych minerałów

Figure 6. Correlation graphs for the results of modeling of the mineral composition determined based on the chemical composition with the results of XRD laboratory measurements for selected minerals

uwzględnieniu spada do 0,49. Mając na uwadze zastrzeżenie o dużej niejednorodności skał w części zlepieńcowej, należy podkreślić bardzo wysoką zgodność przedstawionych wyników obliczeń z danymi XRD. Współczynniki korelacji dla głównych minerałów nie spadają poniżej 0,9 (kwarc: 0,92; skalenie: 0,99; kalcyt: 0,99; dolomit: 0,98; anhydryt: 0,99). Uwzględniony w modelu syderyt, określony tylko w trzech analizach XRD, charakteryzuje się współczynnikiem korelacji 0,87. Minerale reprezentujące część skały odpowiadającą za zailenie, tj. miki, illit/smektyt, chloryt, również cechują się wysokimi współczynnikami, w tym chloryt osiągnął współczynnik $R^2 = 0,97$, miki: 0,89, illit/smektyt: 0,94. Suma minerałów ilastych wykazuje wysoką zgodność wyników obliczeń z danymi XRD na poziomie $R^2 = 0,95$.

Zestawienie wyników interpretacji danych geofizycznych

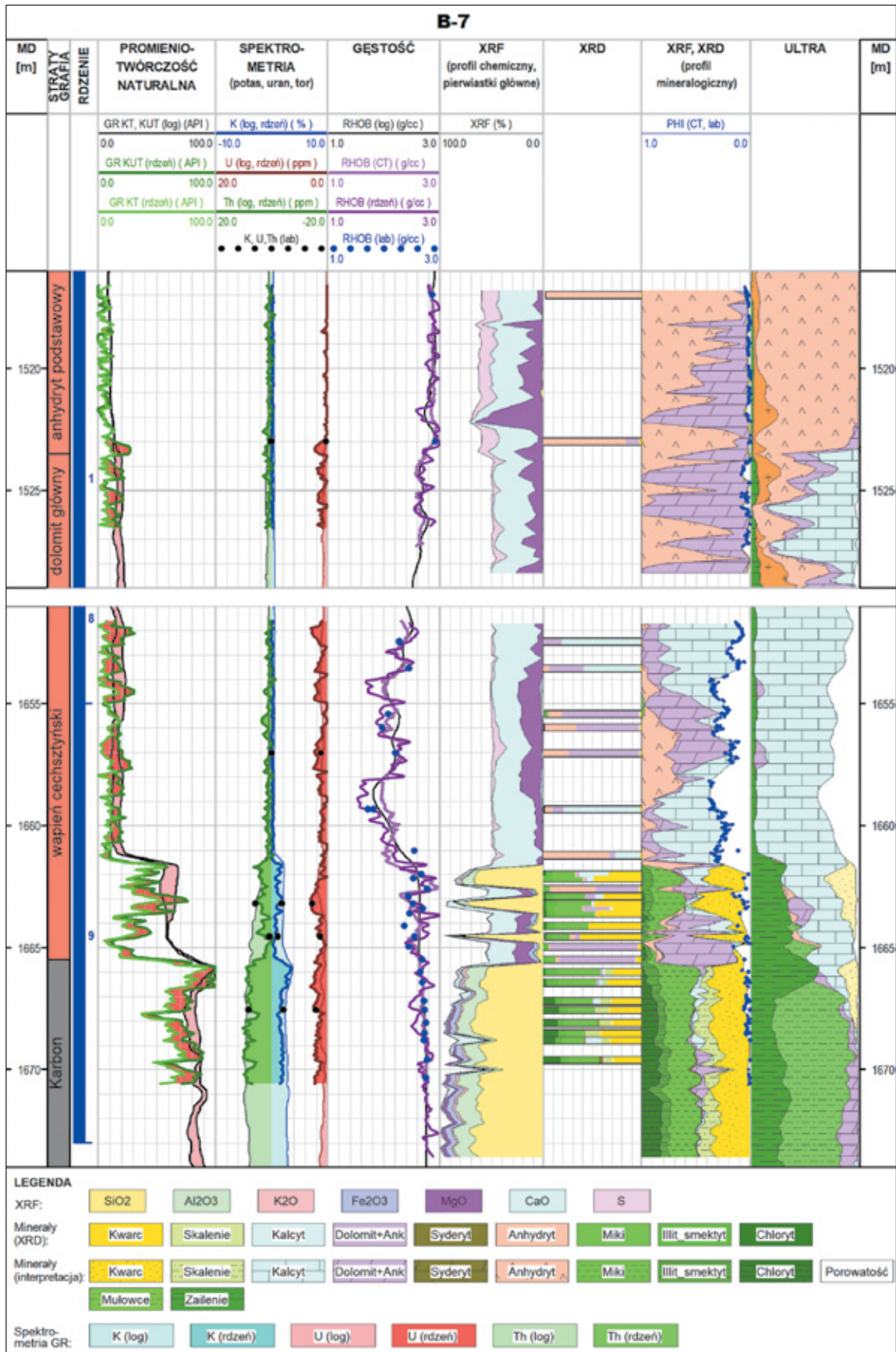
W celu pełnej integracji danych w ostatnim etapie pracy przedstawiono wyniki profilowania rdzeni wiertniczych na tle pomiarów laboratoryjnych oraz krzywych geofizyki otworowej (rysunek 7). Pomiar całkowitej promieniotwórczości naturalnej zaprezentowano w postaci profilowania GR KUT oraz w wersji bez uranu GR KT. Ponadto w kolejnych kolumnach przedstawione zostały spektrometryczne profilowania zawartości potasu, uranu i toru. Uzyskane wyniki zaprezentowano na tle profilowań otworowych, oznaczonych dopiskiem „log”, oraz punktowych badań laboratoryjnych, oznaczonych jako K, U, Th (lab).

Analizując przedstawione dane naturalnej promieniotwórczości gamma, należy zauważyć znacznie większą rozdzielczość pomiarów rdzeni w stosunku do pomiarów geofizyki wiertniczej. Godny podkreślenia jest fakt dużej zgodności punktowych danych radiometrycznych z pomiarami wykonanymi na rdzeniach. Zawartość toru zarejestrowana na rdzeniu jest na podobnym poziomie jak zawartość uzyskana w pomiarach geofizycznych, natomiast zawartość potasu jest nieco obniżona, a zawartość uranu podwyższona w stosunku do pomiarów otworowych. Niemniej jednak spektrometryczne pomiary gamma wykonane na rdzeniach wiertniczych są generalnie zgodne z pomiarami geofizycznymi, a ich zdecydowanie wyższa rozdzielczość daje bardzo szczegółowy obraz promieniotwórczości naturalnej, która z kolei bardzo dobrze koresponduje z wynikami analiz chemiczno-mineralogicznych. Krzywe z pomiarów rdzeni pozwalają na dokładniejsze wyznaczenie granic litologicznych oraz wydzielenie cienkich warstw o podwyższonym zaileniu. Wyniki badań gęstości objętościowej (kolumna GĘSTOŚĆ) przedstawione zostały w postaci punktowych pomiarów gęstości objętościowej

(RHOB lab) z profilowaniami gęstości wykonanymi na rdzeniu metodą gamma-gamma (RHOB rdzeń), profilowaniem gęstości objętościowej z pomiarów tomograficznych (RHOB CT) oraz z pomiarem wykonanym w otworze wiertniczym (RHOB log). Również w tym przypadku zauważalna jest znaczna poprawa rozdzielczości metod z zastosowaniem profilowania rdzeni. Wyniki w części profilu odbiegają od siebie z uwagi na bardzo wysoką czułość metod, braki materiału, spękania czy zmiany średnicy rdzeni (vide Skupio i Dohnalik, 2017). W kolumnie XRF zamieszczony został profil chemiczny rdzenia zbudowany z wybranych pierwiastków głównych. Na wykresach przedstawionych w domenie głębokości zaprezentowano wyniki odpowiadające zawartości tlenków i pierwiastków występujących w matrycy skalnej: tlenku krzemu (SiO_2), tlenku glinu (Al_2O_3), tlenku potasu (K_2O), tlenku żelaza (Fe_2O_3), tlenku magnezu (MgO), tlenku wapnia (CaO) oraz siarki (S). Analizowane interwały można podzielić na trzy główne obszary, z czego do zbadania każdego z nich wykorzystano inną kalibrację.

Na podstawie przeprowadzonych analiz chemicznych XRF można dokonać wstępnej oceny zmian litologii. W interwale występowania anhydrytu od 1517 m do 1524 m w składzie chemicznym skał przeważają wapń oraz siarka, od głębokości 1524 m do 1529 m (dolomit główny) następuje znaczny spadek siarki i wzrost wapnia. W całym analizowanym interwale anhydrytu podstawowego i dolomitu głównego poziom magnezu jest podobny, średnio 20%, z wyraźnym wzrostem w spągowej części anhydrytu do około 60%. W interwale od 1652 m do 1661 m, gdzie występują utwory wapienia cechsztyńskiego, przeważa wapń oraz występują siarka, magnez i żelazo, miejscami również potas. Zmiany w składzie chemicznym skał widoczne są w spągowej części wapienia cechsztyńskiego, od głębokości 1661 m do 1665 m. Miejscami następuje znaczny spadek zawartości wapnia i magnezu, a pojawiają się wysokie udziały takich pierwiastków jak żelazo, potas, glin oraz krzem. Utwory karbonu cechują się natomiast stałym wzrostem wraz z głębokością ilości krzemu, glinu, potasu oraz żelaza. Wapń, magnez i siarka występują w niewielkich ilościach z ewentualnymi wkładkami. W kolumnie XRD zestawiono ilościowe wyniki skumulowanych pomiarów mineralogicznych będących wkładem do zbudowania modeli mineralogiczno-chemicznych. Na ich podstawie wykonano interpretację litologiczną, której wyniki ujęto w kolumnie „XRF, XRD”.

Do obliczenia składu mineralnego w formie procentów objętościowych zastosowane zostało profilowanie porowatości określone na podstawie pomiarów tomograficznych CT, uzupełnione kilkoma próbkami porowatości helowej (PHI CT, lab). W kolumnie ULTRA przedstawiono skład mineralogiczny wyinterpretowany na podstawie profilowań



Rysunek 7. Zestawienie wyników interpretacji pomiarów wykonanych na rdzeniu wiertniczym z wybranymi profilowaniami geofizycznymi oraz wynikami interpretacji litologicznej danych geofizyki wiertniczej wykonanej programem ULTRA

Figure 7. Summary of the results of interpreting the measurements made on the core with the selected geophysical logs and the results of the lithological interpretation of the well logging data performed with the ULTRA program

geofizyki wiertniczej programem ULTRA. Wyniki interpretacji pomiarów rdzeni pozwalają na uzyskanie wyższej rozdzielczości oraz wydzielenie większej liczby składników mineralnych, potwierdzonych wynikami badań laboratoryjnych.

Wnioski

W pracy wykonano interpretację wyników ciągłych badań rdzeni wiertniczych zbudowanych ze skał węglanowych, anhydrytowych, mułowcowych i piaszkowcowych. Badania pozwoliły na przetestowanie nowoczesnej aparatury, modeli mineralogiczno-chemicznych oraz algorytmów obliczeniowych do wykonania profilowania rdzeni wiertniczych o zmiennej litologii oraz kompleksowej integracji i interpretacji danych, łączącej wyniki z przeprowadzonych badań.

Spektrometryczne pomiary gamma na rdzeniu pozwoliły na wykonanie dokładnych analiz potasu, uranu i toru z zapewnieniem zwiększonej rozdzielczości krzywych, jak i na bardziej szczegółowe wydzielenie granic warstw. Umożliwiają one również wprowadzenie dokładniejszej poprawki na potas występujący w płuczce wiertniczej w profilowaniach otworowych. Metody gamma-gamma i CT pozwoliły na wygenerowanie krzywych gęstości objętościowej oraz porowatości, z czego krzywa porowatości została wykorzystana do przeliczenia procentów wagowych poszczególnych składników mineralnych na procenty objętościowe, co w przypadku interwałów o podwyższonej porowatości miało duże znaczenie dla poprawnej analizy ilościowej. Pomiary składu chemicznego wykonane aparaturą przenośną wymagały przeprowadzenia niezbędnych analiz laboratoryjnych składu chemicznego i mineralnego. Uzyskane dane pozwoliły na kalibrację wyników i budowę modeli interpretacyjnych. Kontrola zastosowanych modeli, wykonana poprzez korelacje danych laboratoryjnych z wynikami modelowania, wykazała wysokie współczynniki determinacji R^2 , świadczące o dobrej zgodności. Dane dotyczące składu chemicznego wraz z zestawem badań pomocniczych pozwoliły na uzyskanie informacji o wielu cennych parametrach mineralogicznych i geochemicznych. Pełna interpretacja petrofizyczna pomiarów rdzeni pozwoliła wykazać, przede wszystkim, większą rozdzielczość w stosunku do pomiarów otworowych oraz wydzielić większą liczbę składników budujących analizowane skały.

Zestaw wykorzystanych metod może być stosowany do precyzyjnego określania i badania przejść pomiędzy granicami litologicznymi, jak również może być niezastąpiony w analizach rdzeni archiwalnych pochodzących z otworów, w których nie wykonywano optymalnego zakresu pomiarów otworowych, a dostępne dane nie są kompletne. Szczegółowa reinterpretacja danych archiwalnych oparta na aktualnych

miarach dostępnego materiału skalnego może przynieść sporo korzyści przy jednoczesnym ograniczeniu kosztów.

Nowoczesne narzędzia badawcze mogą rzucić nowe światło na wiele wyników i hipotez dotyczących danych z analizowanych rejonów.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Interpretacja litologiczna wyników profilowania rdzeni wiertniczych na tle pomiarów geofizyki otworowej*, praca INiG – PIB; nr zlecenia: 0039/SW/2021, nr archiwalny: DK-4100-0027/2021.

Literatura

- Bartosek J., 1977. Citliva metoda stanoveni obsahu prirodzene radio-aktivnich prvku v horninach. *Kandidatska disertacni prace. Geofizika, Brno*.
- Bruker. <<https://www.bruker.com>> (dostęp: wrzesień 2019).
- Conrey R.M., Goodman E.M., Bettencourt N., Seyfarth A., Van Hoose A., Wolff J.A., 2014. Calibration of a portable X-ray fluorescence spectrometer in the analysis of archaeological samples using influence coefficients. *Geochemistry Exploration Environment Analysis*, 14(3): 291–301. DOI: 10.1144/geochem2013-198.
- Dohnalik M., Kaczmarczyk J., 2019. Pomiary dwuenergetycznej tomografii (Dual Energy CT) w celu badania skał. *Nafta-Gaz*, 75(2): 83–88. DOI: 10.18668/NG.2019.02.03.
- Georadis. <<https://www.georadis.com>> (dostęp: wrzesień 2020).
- Geotek. <<https://www.geotek.co.uk>> (dostęp: listopad 2021).
- Kowalska S., 2013. Określanie ilościowego składu mineralnego skał zawierających minerały ilaste metodą Rietvelda. *Nafta-Gaz*, 69(12): 887–893.
- Kozak M., 2010. Zastosowanie optycznej spektrometrii emisyjnej, ze wzbudzeniem w plazmie indukowanej w badaniach przetworów naftowych. *Nafta-Gaz*, 66(7): 606–612.
- Lezzerini M., Tamponi M., Bertoli M., 2014. Calibration of XRF data on silicate rocks using chemicals as in-house standards. *Atti della Società Toscana di Scienze Naturali – Memorie Serie A*, 121: 65–70.
- Ogburn D., Sillar B., Sierra J.C., 2012. Evaluating effects of chemical weathering and surface contamination on the in situ provenance analysis of building stones in the Cuzco region of Peru with portable XRF. *Journal of Archaeological Science*, 40(4): 1823–1837. DOI: 10.1016/j.jas.2012.09.023.
- PoROus materials examination SoftwarE. <<http://porose.pl/>> (dostęp 31.08.2022)
- Rowe H., Hughes N., Robinson K., 2012. The quantification and application of handheld energy-dispersive x-ray fluorescence (ED-XRF) in mudrock chemostratigraphy and geochemistry. *Chemical Geology*, 324–325: 122–131. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2011.12.023
- Saintgobain. <<https://www.crystals.saintgobain.com>> (dostęp: październik 2015).
- Skupio R., 2014. Wykorzystanie przenośnego spektrometru XRF do pomiarów składu chemicznego skał. *Nafta-Gaz*, 70(11): 771–777.
- Skupio R., 2021. Określanie składu chemicznego i mineralnego skał z wykorzystaniem przenośnego spektrometru XRF pracującego w atmosferze helu. *Nafta-Gaz*, 77(4): 227–234. DOI: 10.18668/NG.2021.04.02.
- Skupio R., Dohnalik M., 2015. Improvement spectrometric gamma measurements on shale cores with the use of the BGO scintillation detector. *Nafta-Gaz*, 71(11): 847–855. DOI: 10.18668/NG2015.11.06

Skupio R., Dohnalik M., 2017. Pomiar gamma-gamma oraz komputerowa tomografia rentgenowska na rdzeniach wiertniczych skał osadowych. *Nafta-Gaz*, 73(8): 571–582. DOI: 10.18668/NG.2017.08.04.

Skupio R., Zagórska U., 2020. Kalibracja wyników analiz chemicznych piaskowców czerwonego spągowca wykonanych

przenośnym spektrometrem XRF. *Nafta-Gaz*, 76(1): 12–17. DOI: 10.18668/NG.2020.01.02.

Wieczorek A., 2012. Ocena możliwości wykorzystania techniki spektrometrii rentgenowskiej z dyspersją fali do badania zawartości szkodliwych i kancerogennych metali ciężkich w produktach naftowych. *Nafta-Gaz*, 68(10): 699–707.



Dr inż. Rafał SKUPIO
Adiunkt; kierownik Zakładu Geofizyki Wiertniczej
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: rafal.skupio@inig.pl



Mgr inż. Katarzyna DRABIK
Główny specjalista inżynierijno-techniczny
w Zakładzie Geofizyki Wiertniczej
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: katarzyna.drabik@inig.pl



Mgr inż. Benedykt KUBIK
Główny Specjalista Inżynierijno-Techniczny
w Zakładzie Geofizyki Wiertniczej
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: benedykt.kubik@inig.pl



Mgr Anna PRZELASKOWSKA
Starszy specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie
Geofizyki Wiertniczej
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: anna.przelaskowska@inig.pl

OFERTA BADAWCZA ZAKŁADU INŻYNIERII NAFTOWEJ

- analiza przyczyn oraz badania stopnia uszkodzenia skał zbiornikowych w strefie przyotworowej,
- ocena głębokości infiltracji fazy ciekłej do skał zbiornikowych,
- ocena wpływu roztworów soli i cieczy wiertniczych na skały ilaste strefy przyotworowej,
- pomiary parametrów reologicznych cieczy i niektórych ciał stałych w zakresie temperatur od –40 do 200°C oraz ciśnieniami do 150 bar,
- ocena stateczności ścian otworów wiertniczych,
- symulacja eksploatacji kawernowych podziemnych magazynów gazu ziemnego wykonanych w utworach solnych, z uwzględnieniem konwencji komór,
- zastosowanie technologii mikrobiologicznych do stymulacji odwiertów oraz usuwania osadów parafinowych w odwiertach i instalacjach powierzchniowych,
- projektowanie zabiegów mikrobiologicznej intensyfikacji wydobywania ropy (MEOR),
- projektowanie zabiegów odcinania dopływu wód złożowych do odwiertów,
- określanie nieredukowalnego nasycenia próbek skały wodą złożową,
- testy zawadniania z użyciem wody, solanki lub CO₂,
- fotograficzne dokumentowanie rdzeni wiertniczych wraz z dowiezaniem wyników badań laboratoryjnych i innych informacji,
- określanie właściwości mechanicznych oraz sejsmoakustycznych skał w próbach okrucowych,
- oznaczenie kątów kontaktu, napięć powierzchniowych i międzyfazowych,
- badania ścisłości przestrzeni porowej skał,
- analiza zjawisk migracji i ekshalacji gazu ziemnego oraz występowania ciśnien w przestrzeniach międzyrurowych,
- interpretacja wyników opróbowań i testów hydrodynamicznych metodami oprogramowaniem autorstwa INiG-PIB,
- określanie zdolności produkcyjnej odwiertów,
- opracowywanie specjalistycznego oprogramowania z zakresu inżynierii naftowej.



Kierownik: dr inż. Renata Cicha-Szot **Adres:** ul. Lubicz 25 A, 31-503 Kraków
Telefon: 12 617 76 65 **Faks:** 12 430 38 85 **E-mail:** renata.cicha-szot@inig.pl



INSTYTUT NAFTY I GAZU
– Państwowy Instytut Badawczy