

## Detekcja stref o lepszych parametrach zbiornikowych na podstawie atrybutów obliczanych z inwersji sejsmicznej

### Detection of better reservoir parameters zones based on attributes calculated from seismic inversion

Robert Bartoń, Andrzej Urbaniec, Kinga Filipowska-Jeziorek

*Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

**STRESZCZENIE:** Celem artykułu było wyodrębnienie stref o korzystniejszych parametrach zbiornikowych na podstawie analizy atrybutów sejsmicznych obliczanych z inwersji sejsmicznej w połączeniu z danymi otworowymi. Obliczenia przeprowadzono na wolumenie sejsmicznym ze zdjęcia 3D usytuowanego w środkowej części przedgórza Karpat. Przedmiotem badań była stropowa część kompleksu węglanowego górnej jury. Do identyfikacji stref o preferowanych parametrach wykorzystane zostały wykresy krzyżowe atrybutów impedancji fali podłużnej względem Lambda-Rho ( $Z_p - \lambda\rho$ ) oraz Lambda-Rho względem Mu-Rho ( $\lambda\rho - \mu\rho$ ). W obliczeniach wykorzystano opcję *horizon probe* dostępną w module *Geobody Interpretation* oprogramowania Petrel. Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że najlepsze dopasowanie obrazu na przekrojach sejsmicznych z profilowaniem porowatości (PHI) w otworze G-4 uzyskano dla wariantu obliczeń Lambda-Rho vs. Mu-Rho, w którym w obrębie wyodrębnionych stref o lepszych parametrach zbiornikowych wydzielono trzy klasy zakresów wartości. Pozwoliło to również w lepszym stopniu zwizualizować zmienność analizowanych parametrów. Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że utwory węglanowe górnej jury w obszarze badań mają zróżnicowane parametry zbiornikowe, przy czym strefy o lepszych własnościach zlokalizowane są głównie w stropowej części tego kompleksu. Generalnie rejon o lepszym rozwoju własności zbiornikowych znajduje się na północny zachód od analizowanego otworu G-4. Można przypuszczać, że jest to związane z obecnością w tym rejonie regionalnych dyslokacji, wokół których doszło do rozwoju szczelinowatości. Najprawdopodobniej dodatkowym czynnikiem odpowiedzialnym za wzrost porowatości w tej strefie jest powierzchnia krasowa, rozwinięta bezpośrednio w stropie utworów jury. Prezentowana metodyka może znaleźć zastosowanie nie tylko do bezpośredniej identyfikacji poziomów skał zbiornikowych o preferowanych parametrach, ale może być też szeroko wykorzystywana w różnego typu analizach i modelowaniach przestrzennych.

**Słowa kluczowe:** skały węglanowe, inwersja sejsmiczna, atrybuty sejsmiczne, wykresy krzyżowe, parametry zbiornikowe.

**ABSTRACT:** The aim of this paper was to distinguish zones with more preferred reservoir parameters based on the analysis of seismic attributes calculated from seismic inversion, combined with well data. The calculations were performed on 3D seismic volumes located in the central part of the Carpathian Foreland. The subject of the study was the upper part of the Upper Jurassic carbonate complex. Cross plots of longitudinal wave impedance attributes against Lambda-Rho ( $Z_p - \lambda\rho$ ) and Lambda-Rho against Mu-Rho ( $\lambda\rho - \mu\rho$ ) were used to identify zones with preferred parameters. The calculations used the horizon probe option available in the Geobody Interpretation module in Petrel software. Based on the results, it was concluded that the best match on seismic sections with porosity profiling (PHI) in G-4 well was obtained for the variant of Lambda-Rho vs. Mu-Rho calculations, in which three classes of value ranges were separated within the identified zones with preferable reservoir parameters. It allowed to better visualize the variability of the analyzed parameters. The results of the research indicate that the Upper Jurassic carbonate formations in the study area are characterized by varying reservoir parameters, with the zones with better properties located mainly in the top part of this complex. In general, the region with better development of reservoir properties is located to the northwest of the analyzed G-4 well. It can be assumed that this is due to the presence of regional dislocations in this area, around which fracturing has developed. Most likely, an additional factor responsible for the increase in porosity in this zone is the karst surface, developed directly in the uppermost part of the Jurassic formations. The presented methodology can find application not only for direct identification of reservoir intervals with preferred parameters, but can be widely used in various types of spatial analysis and geophysical modeling.

**Key words:** carbonate rocks, seismic inversion, seismic attributes, cross plots, reservoir parameters.

Autor do korespondencji: R. Bartoń, e-mail: [robert.barton@inig.pl](mailto:robert.barton@inig.pl)

Artykuł nadesłano do Redakcji: 12.09.2022 r. Zatwierdzono do druku: 05.12.2022 r.

Wstęp

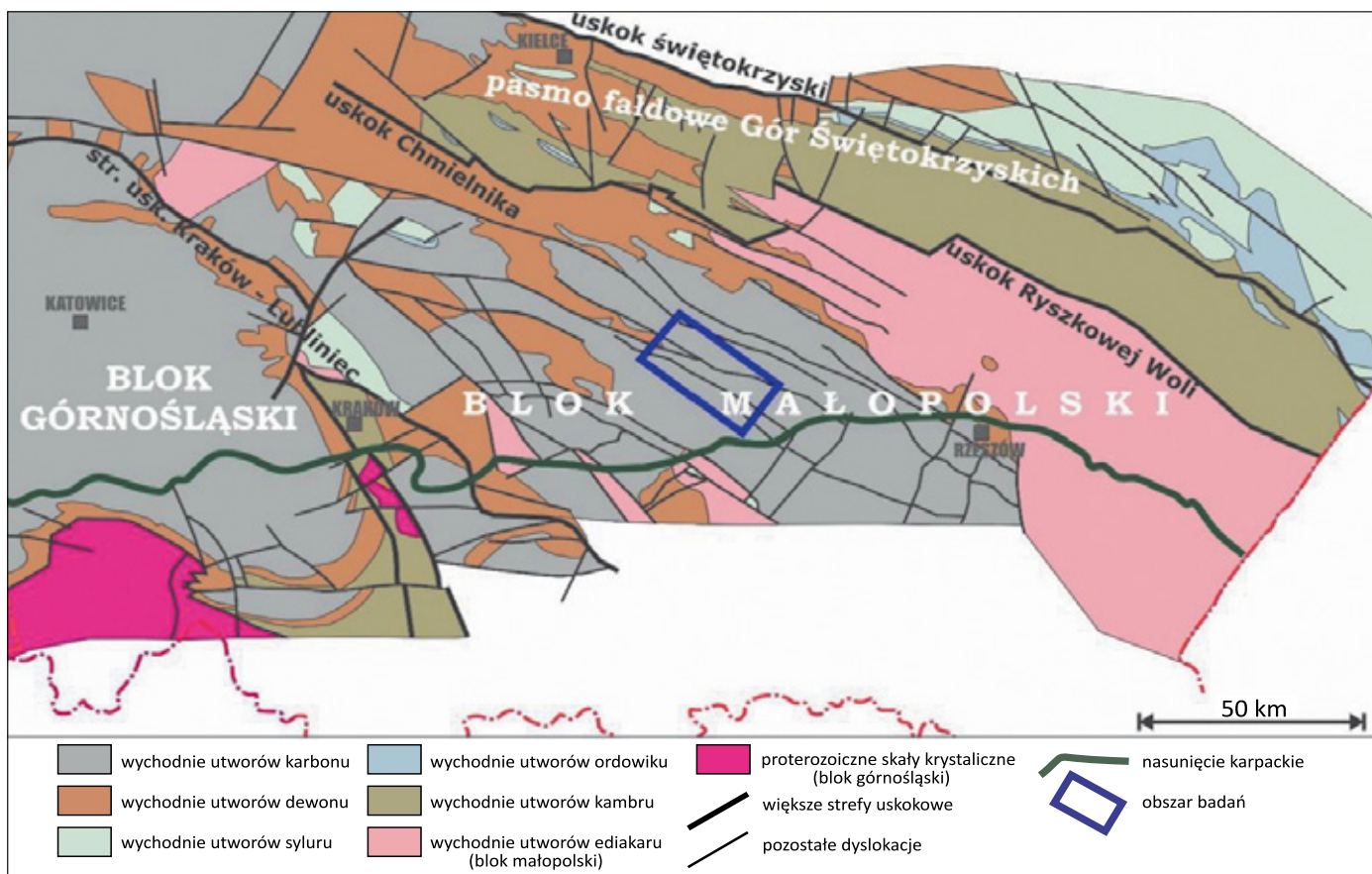
Wybór stref o najbardziej korzystnych własnościach zbiornikowych w obrębie struktur geologicznych powinien być oparty na szczegółowej analizie dostępnych danych otworowych i sejsmicznych – pod warunkiem odpowiedniej jakości i rozdzielczości tych danych. W literaturze można znaleźć przykłady wielu prac, które są ukierunkowane na rozpoznanie zmienności parametrów zbiornikowych na podstawie analizy obrazu sejsmicznego, w tym opartych na interpretacji standardowych atrybutów sejsmicznych (Chopra i Marfurt, 2007; Pigott et al., 2013; Torrado et al., 2014; Sarhan, 2017; Bartoń i Urbaniec, 2018), jak również atrybutów obliczonych z inwersji sejsmicznej (Munyithya et al., 2019; Ogbamikhumi i Igbinigie, 2020; Kaczmarczyk-Kuszpit, 2021).

Wyniki badań prezentowane w ramach niniejszego artykułu obejmują analizę atrybutów sejsmicznych oraz danych sejsmicznych przetworzonych metodą inwersji w celu identyfikacji stref o korzystniejszych własnościach zbiornikowych. Przedmiotem badań był kompleks utworów węglanowych górnej jury z obszaru centralnej części przedgórza Karpat. W strefie tej usytuowany jest otwór G-4, którego głębokość końcowa

znajduje się w środkowej części profilu jury górnej. Otwór ten posiada komplet profiliowań geofizycznych. W obszarze tym zlokalizowane jest również zdjęcie sejsmiczne 3D wykonane w roku 1998 i poddane reprocessingowi w roku 2015.

Niniejszy artykuł stanowi kontynuację badań utworów górnej jury i dolnej kredy pod kątem możliwości identyfikacji stref o lepszych parametrach zbiornikowych w skałach węglanowych, których wstępne wyniki przedstawiono we wcześniejszej publikacji (Bartoń et al., 2022). Prezentowany obecnie obszar badań usytuowany jest na północny zachód od rejonu omówionego we wspomnianej pracy i charakteryzuje się on nieco mniejszą miąższością utworów węglanowych, wynikającą z erozyjnego ścięcia najmłodszych warstw. W stropowej partii kompleksu węglanowego górnej jury w tej strefie występują wapień organodetrytyczne serii muszlowcowo-oolitowej dolnej, a poniżej nich – biolityty koralowcowe serii koralowcowo-onkolitowej (Gutowski et al., 2007; Urbaniec, 2021), które generalnie uznawane są za skały o bardzo dobrych parametrach zbiornikowych (Gliniak et al., 2002, 2004).

W ramach niniejszej pracy do analizy wykorzystano zarówno standardowe atrybuty sejsmiczne dostępne w programie Petrel (w artykule zaprezentowano *Time Gain, Relative*



Rysunek 1. Lokalizacja obszaru badań na tle głównych jednostek tektonicznych Polski pod pokrywą permsko-mezozoiczną i kenozoiczną (według Żelaźniewicza et al., 2011, częściowo zmienione)

Figure 1. Location of the study area against the main tectonic units of Poland under the Permian-Mesozoic and Cenozoic cover (according to Żelaźniewicz et al. 2011, modified)

*Acoustic Impedance, RMS Amplitude* oraz *First Derivative*), jak również atrybuty obliczone z inwersji sejsmicznej, takie jak: impedancja fali podłużnej ( $Z_p$ ), iloczyn gęstości i stałej Lamégo ( $\lambda\rho$ ) oraz iloczyn gęstości i modułu sprężystości ( $\mu\rho$ ).

### Charakterystyka geologiczna rejonu badań

Obszar badań usytuowany jest w centralnej części przedgórze Karpat, a w odniesieniu do starszych pięter strukturalnych – na obszarze bloku małopolskiego (rysunek 1). Budowa geologiczna analizowanego rejonu, z podziałem na poszczególne piętra strukturalne, omówiona została szczegółowo we wcześniejszych publikacjach (Urbaniec et al., 2019, 2020; Bartoń et al., 2022), dlatego też w niniejszym artykule przedstawiono ją jedynie w sposób skrótowy.

Najniższe piętro strukturalne w obszarze badań reprezentowane jest przez serię neoproterozoicznych skał anchimetamorficznych (Moryc i Jachowicz, 2000; Jachowicz-Zdanowska, 2011). Środkowe piętro strukturalne tworzą skały mezo-paleozoiczne o znacznej sumarycznej miąższości, dochodzącej maksymalnie do około 2000 m. W południowej części rejonu badań bezpośrednio na utworach ediakarskich zalegają osady dolnego paleozoiku o niewielkiej miąższości (rzędu kilkudziesięciu metrów), a ich zasięg przestrzenny jest w niewielkim stopniu udokumentowany przez głębokie otwory wiertnicze (*vide* Moryc, 1996; Moryc i Nehring-Lefeld, 1997; Buła i Habryn, 2008).

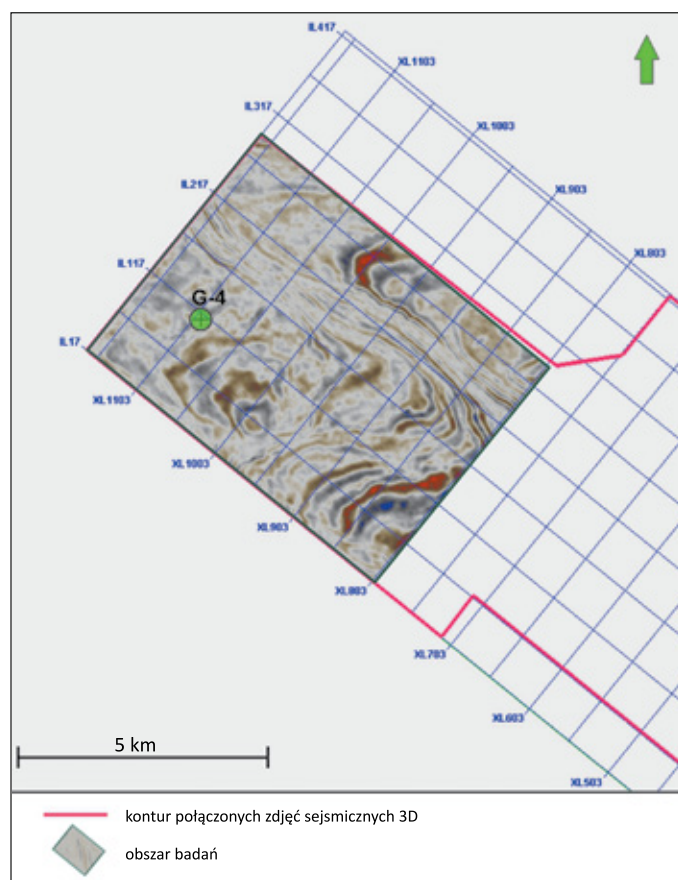
Wyżej w profilu zalegają utwory górnego paleozoiku o różnicowanej miąższości (od kilkudziesięciu do około 400 m), reprezentowane przez ilasto-piaszczyste osady dewonu dolnego oraz serię węglanowych osadów dewonu i karbonu (Zajac, 1984; Moryc, 2006a). Kompleks mezozoiczny reprezentowany jest przez utwory klastyczne i węglanowe dolnego i środkowego triasu, miąższą serią utworów węglanowych górnej jury–dolnej kredy oraz węglanowo-klastyczną serią górnej kredy (Jawor, 1970; Moryc, 1996, 2006b, 2014; Gutowski et al., 2007; Urbaniec et al., 2010, 2021). Na części obszaru utwory kredy górnej zostały całkowicie usunięte w wyniku polaramijskiej erozji. Maksymalna miąższość utworów jury górnej wraz z kredą dolną w omawianym obszarze wynosi około 1100 m (Gutowski et al., 2007), natomiast kredy górnej – około 450 m (Urbaniec et al., 2021).

Najmłodsze piętro strukturalne w obszarze badań tworzą utwory miocenu zapadliska przedkarpackiego. Kompleks autochtonicznych warstw miocenu na obszarze badań można podzielić na trzy główne jednostki litostratygraficzne: dolnobadeńską klastyczną serią podewaporatową, górnobadeńską serią ewaporatową oraz górnobadeńsko-sarmacką klastyczną serią nadewaporatową (Jasionowski, 1997; Urbaniec et al., 2019).

### Dane sejsmiczne i otworowe

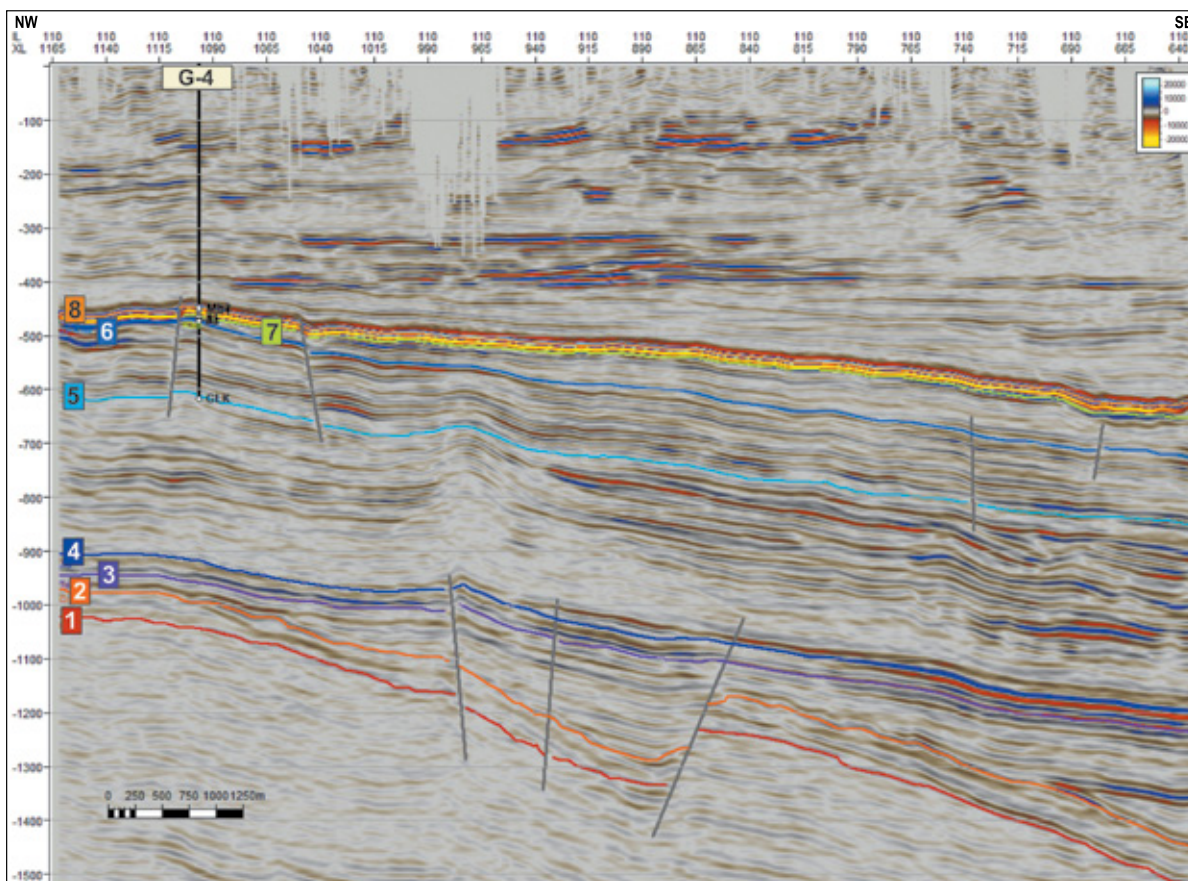
Do badań wytypowane zostało zdjęcie sejsmiczne 3D uzyskane w wyniku połączenia dwóch zdjęć 3D, przy czym obliczenia wykonano na wolumenie sejsmicznym w wersji czasowej przed składaniem (PreSTM), ograniczonym do zdjęcia północnego (rysunek 2), wykonanego w roku 1998 i poddanego reprocessingowi w roku 2015. Dane te cechują się dobrą rozdzielczością pionową, wynoszącą w obrębie analizowanej części profilu jury górnej około 15 m. Obraz sejsmiczny w wersji PreSTM charakteryzuje dobra dynamika i ciągłość refleksów sejsmicznych, co przekłada się na możliwość szczegółowego odwzorowania zarówno budowy strukturalnej, jak i zmienności przestrzennej poszczególnych parametrów ośrodka geologicznego. W obliczeniach i wizualizacji wyników wykorzystano podstawową wersję interpretacji strukturalnej, wykonaną w Geofizyce Kraków S.A., obejmującą korelację ośmiu granic sejsmicznych o zasięgu regionalnym oraz interpretację powierzchni uskokowych (Nawieśniak, 2016) (rysunek 3).

W ramach niniejszej pracy do obliczeń wykorzystano interpretację trzech najbardziej istotnych granic sejsmicznych,



**Rysunek 2.** Obszar badań na tle zasięgu zdjęcia sejsmicznego 3D wraz z lokalizacją analizowanego otworu wiertniczego G-4

**Figure 2.** Study area on the range of the 3D seismic survey with the location of the analyzed G-4 well



**Rysunek 3.** Czasowy przekrój sejsmiczny IL 110 w wersji PreSTM wraz z interpretacją sejsmiczną (według Geofizyki Kraków S.A.): 1 – strop neoproterozoiku, 2 – strop karbonu, 3 – strop pstrego piaskowca środkowego i dolnego, 4 – spąg jury, 5 – granica wewnątrzjurska, 6 – strop górnej jury i dolnej kredy, 7 – strop kredy górnej, 8 – strop serii ewaporatowej badenu

**Figure 3.** Seismic section IL 110 in the time domain with interpretation (by Geofizyka Kraków S.A.): 1 – the top of Neoproterozoic, 2 – the top of Carboniferous, 3 – the top of Middle and Lower Buntsandstein, 4 – the bottom of Jurassic, 5 – the intra-Jurassic horizon, 6 – the top of Lower Cretaceous – Upper Jurassic complex, 7 – the top of Upper Cretaceous, 8 – the top of Badenian evaporites

związanych z utworami jurajskimi (rysunek 3), tj. Jsp (spąg utworów jury), Jwew (granica wewnątrzjurska związana z powierzchnią niezgodności kątowej, występującej w obrębie kompleksu utworów górnej jury) oraz J3+K1str (strop nierozdzielonych utworów górnej jury i dolnej kredy).

Otwór G-4 zrealizowany został w roku 2003 w celu rozpoznania wyinterpretowanej pułapki o charakterze strukturalnym w stropowej partii utworów jury. Do analiz wykorzystano interpretację parametrów złożowych (nasylenie wodą, porowatość), która stanowiła ważny element w korelacji parametrów petrofizycznych i geofizycznych z danymi sejsmicznymi (rysunek 4). Interpretację tych parametrów wykonano w Geofizyce Kraków S.A.

on wykonany na podstawie profilowania akustycznego (DT) i gęstości syntetycznej (RHOB) oraz wyekstrahowanych sygnałów z wolumenu sejsmicznego 3D w otoczeniu otworu G-4.

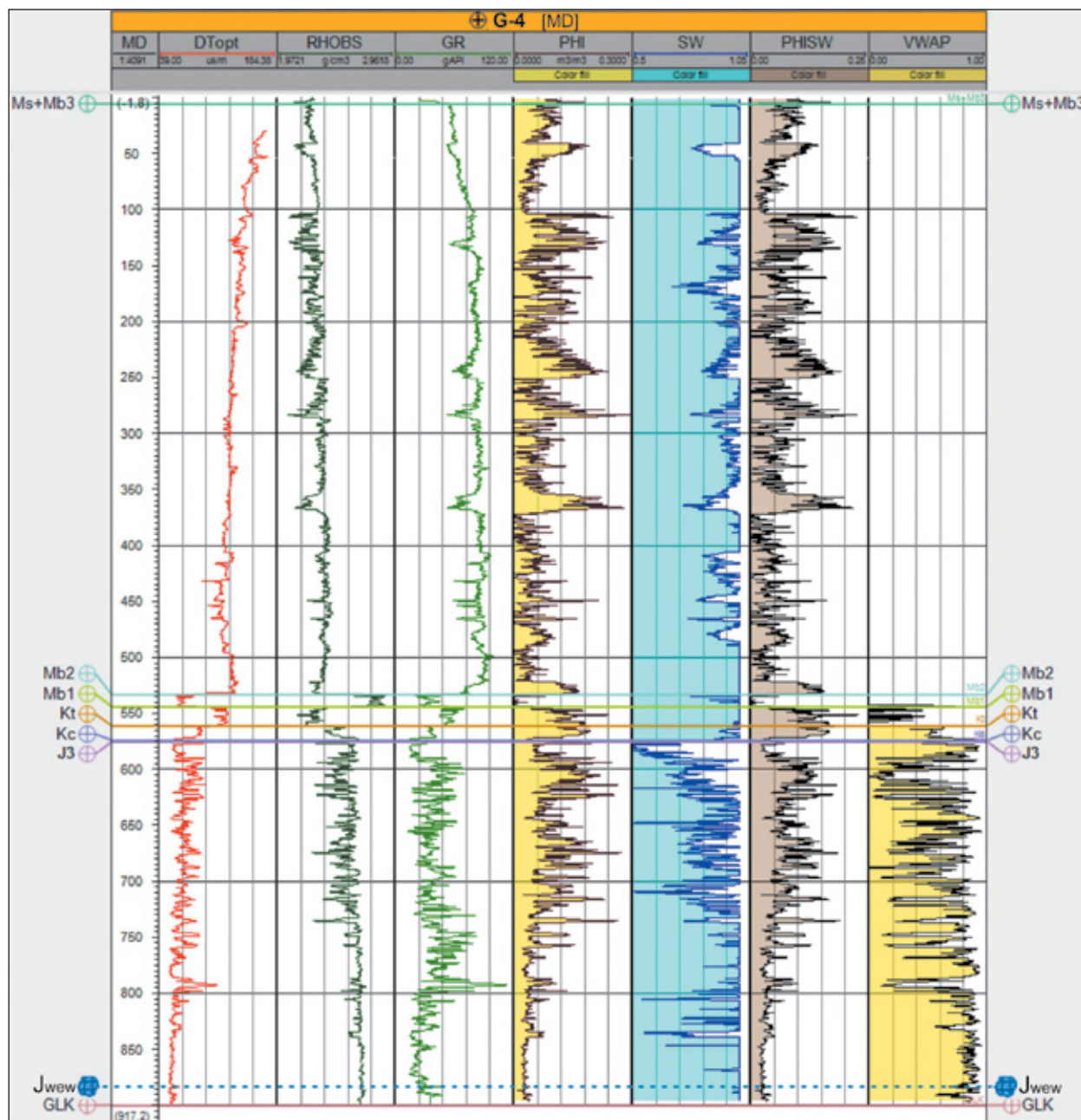
Do ekstrakcji sygnału sejsmicznego użyto metody statystycznej. Uzyskano sygnał o kształcie zero-fazowym i wynikowym zakresie częstotliwości otrzymanym z tras sejsmicznych usytuowanych w otoczeniu analizowanego otworu. Uzyskane wyniki wskazują na dobre dowiązanie danych otworowych z danymi sejsmicznymi. Otrzymano poprawne skorelowanie wyinterpretowanych granic stratygraficznych w otworze G-4 z obrazem falowym profilu sejsmicznego, a tym samym wiarygodne określenie relacji czas-głębokość w pozycji i w otoczeniu analizowanego otworu.

### Konstrukcja sejsmogramu syntetycznego

Dowiązanie danych otworowych do danych sejsmicznych wykonywano opierając się na skonstruowanym sejsmogramie syntetycznym dla analizowanego otworu G-4 (rysunek 5). Został

### Analiza atrybutów sejsmicznych

Atrybuty sejsmiczne zostały wprowadzone do badań sejsmicznych na początku lat 70. ubiegłego wieku i są obecnie szeroko wykorzystywane w różnych analizach litologicznych



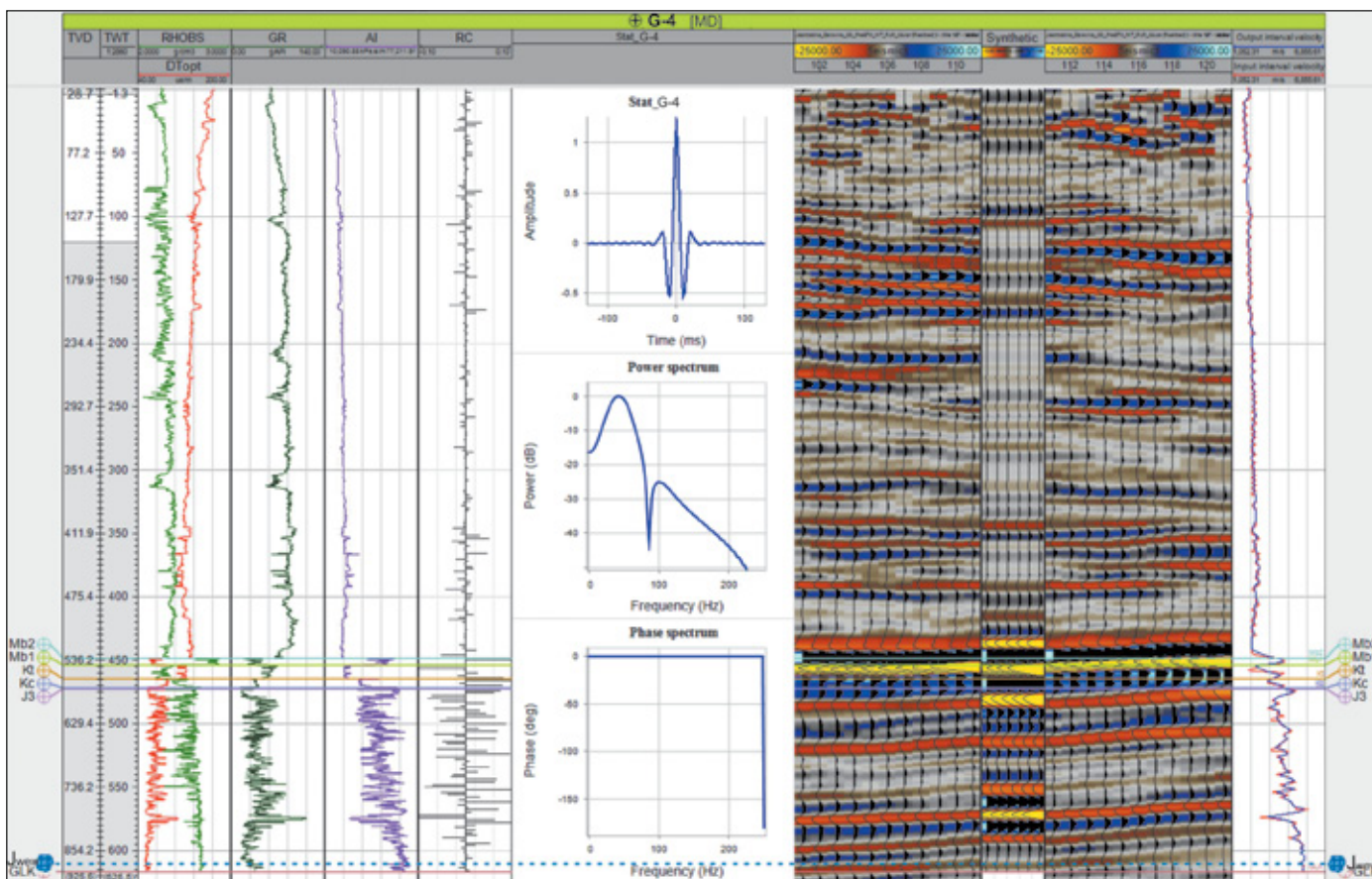
**Rysunek 4.** Zestawienie wybranych profilowań geofizycznych z wynikami interpretacji parametrów petrofizycznych (otwór G-4): DT – profilowanie akustyczne, RHOBS – syntetyczne profilowanie gęstości, PHI – porowatość, SW – zawodnienie, PHISW – nasycenie porów wodą, VWAP – zawartość kalcytu

**Figure 3.** Compilation of selected well log data with interpretation of reservoir parameters (G-4 well): DT – sonic log, RHOBS – synthetic bulk density, PHI – porosity, SW – total water saturation, PHISW – pore water saturation, VWAP – calcite concentration

i petrofizycznych poziomów zbiornikowych. Pozwalają one wyodrębnić cechy ilościowe oraz jakościowe z danych sejsmicznych oraz wzmacniają wizualnie obrazy w szczegółowej interpretacji sejsmicznej. Wyróżnia się różne typy atrybutów sejsmicznych, które są bezpośrednio wrażliwe na pożądaną cechę geologiczną lub właściwość zbiornika, umożliwiając m.in. określenie różnych elementów budowy strukturalnej lub środowiska depozycji, pozwalając wnioskować z większą dokładnością o konkretnych cechach (Chopra i Marfurt, 2007; Azevedo i Pereira, 2009; Ferguson et al., 2010; Pigott

et al., 2013; Rosa i Vincentelli, 2017; Sarhan, 2017; Bartoń i Urbaniec, 2018).

W przeprowadzonych badaniach przeanalizowano atrybuty sejsmiczne, które w najlepszym stopniu odwzorowywały relacje litologiczno-facjalne w korelacji z danymi geofizyki otworowej w obrębie kompleksu węglanowego jury górnej. W artykule zaprezentowano cztery wybrane atrybuty: *Time Gain* (wzmocnienie sygnału), *Relative Acoustic Impedance* (względna impedancja akustyczna), *RMS Amplitude* (amplituda średnia kwadratowa) oraz *First Derivative* (pierwsza pochodna)



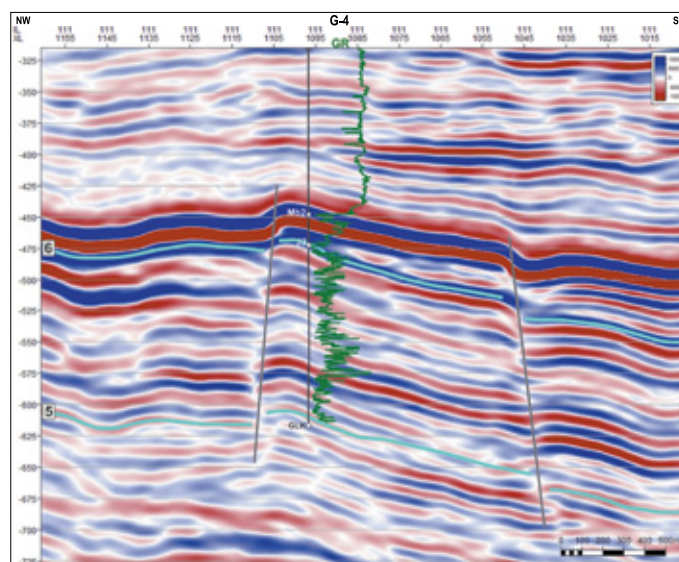
Rysunek 5. Sejsmogram syntetyczny obliczony dla otworu G-4

Figure 5. Synthetic seismogram calculated for G-4 well

w najlepszym stopniu obrazujące zmiany litologiczno-facjalne oraz zmiany porowatości.

Użycie atrybutu *Time Gain*, należącego do grupy związanej z przetwarzaniem sygnału i stosowanego m.in. w celu podkreślenia różnic litologicznych, umożliwiło wychwycenie zmienności pomiędzy poszczególnymi warstwami występującymi w profilu jury górnej (rysunek 6). W obrazie tego atrybutu dobrze widoczne są również niezgodności kątowe i zaburzenia układu refleksów, a także niezgodności związane z dyslokacjami. Zmienność zapisu sejsmicznego dobrze koreluje się z dynamiką zmian profilowania GR (profilowanie naturalnej promieniotwórczości gamma).

Kolejnym prezentowanym atrybutem jest *Relative Acoustic Impedance*, często stosowany jako atrybut pomocniczy w procesie interpretacji geologicznej, wskazujący względny kontrast impedancji akustycznej. Jest on bardzo pomocny w identyfikacji i uszczegółowieniu przebiegu powierzchni dyslokacji, zmian litofacjalnych, a także w śledzeniu zmian porowatości w obrębie formacji skalnych (Azevedo i Pereira, 2009; Urbaniec, 2021). Zestawienie profilowania GR dla linii IL 111 w pozycji otworu pozwala prześledzić dynamikę zmian litofacjalnych i wyodrębnić warstwy o potencjalnie lepszych własnościach zbiornikowych w utworach jury górnej (rysunek 7).



Rysunek 6. Przekrój sejsmiczny IL 111 w wersji atrybutu *Time Gain* wraz z profilowaniem GR w otworze G-4; 5 – granica wewnątrzjurajska, 6 – strop górnej jury i dolnej kredy

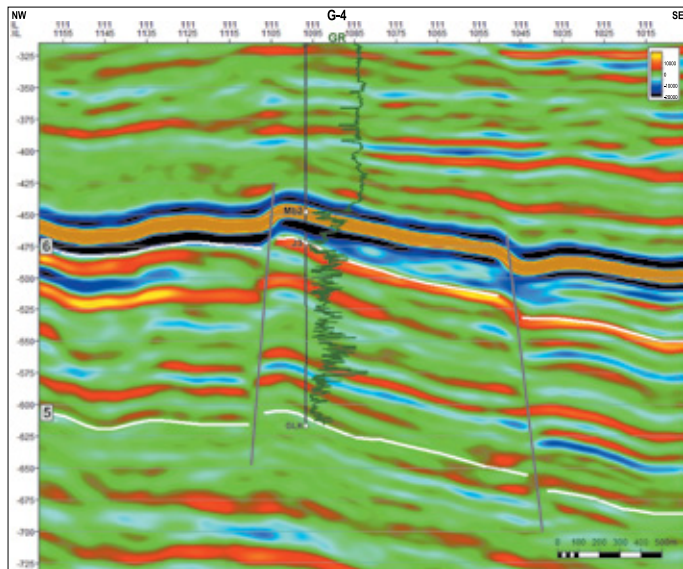
Figure 6. Time section IL 111 of the Time Gain attribute and GR curve in the G-4 well; 5 – the intra-Jurassic horizon 6 – the top of Lower Cretaceous – Upper Jurassic complex

*RMS Amplitude* to atrybut odzwierciedlający informację o wielkości energii zawartej w trasach sejsmicznych. Może być on wykorzystywany m.in. do śledzenia zmian litologicznych,

do identyfikacji stref nasycen węglowodorami, stref dyslokacyjnych oraz stref o zwiększonej porowatości (Frankowicz, 2008; Azevedo i Pereira, 2009; Urbaniec, 2021). Analiza obrazu badanych utworów jury górnej wskazuje na wyraźne zróżnicowanie wartości atrybutu *RMS Amplitude* (kolory jasnoniebieski

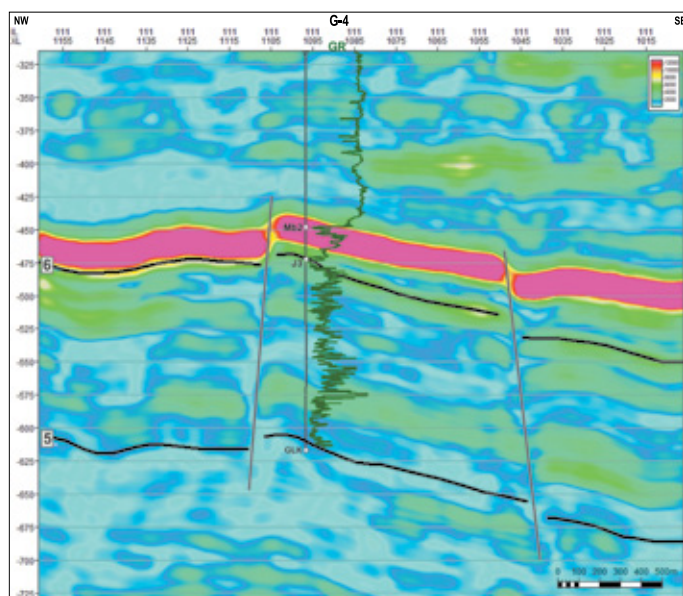
i zielony), świadczące o obecności naprzemiennych warstw o zróżnicowanej litologii (wapienie, dolomity i margle) (rysunek 8). Natomiast anomalnie wysokie wartości amplitudy (kolor czerwony) związane są z utworami ewaporatowymi górnego badenu.

Atrybut *First Derivative* znajduje zastosowanie w analizach stratygraficznych, przy interpretacji litologii oraz śledzeniu zmian facjalnych. Atrybut ten uwypukla ciągłość i ostrość refleksów sejsmicznych, co przekłada się na lepszą korelację amplitudy z litologią. Dość często jest wykorzystywany w analizach utworów cienkowarstwowych, zawierających akumulacje węglowodorów, które stwarzają znaczącą trudność w interpretacji (Urbaniec et al., 2019). W obrazie tego atrybutu w profilu analizowanej formacji wyraźnie rysują się pakiety ciągłych refleksów, które mogą być utożsamiane z osadami o charakterze warstwowym. Atrybut ten może być pomocny w prawidłowym wydzieleniu poszczególnych warstw o zmiennych parametrach w obrazie sejsmicznym (rysunek 9).



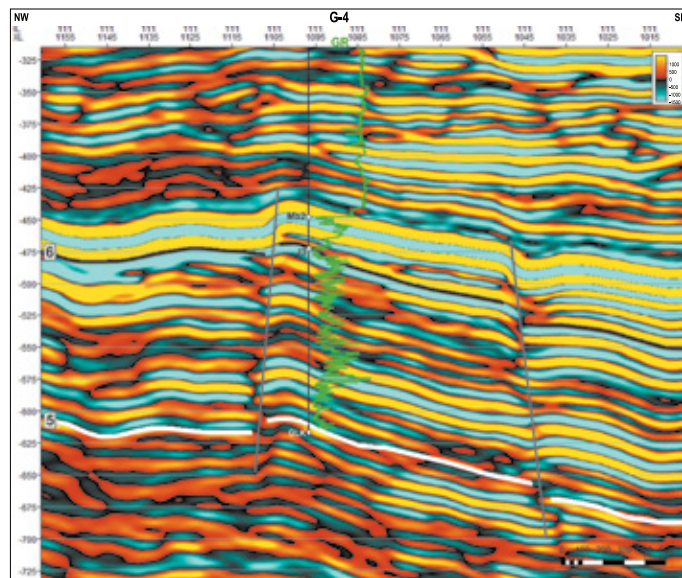
**Rysunek 7.** Przekrój sejsmiczny IL 111 w wersji atrybutu *Relative Acoustic Impedance* wraz z profilowaniem GR w otworze G-4 (strefy o najlepszych właściwości zbiornikowych w stropowej partii jury odpowiadają kolorom żółtym i czerwonym); pozostałe objaśnienia jak na rysunku 6

**Figure 7.** Time section IL 111 of Relative Acoustic Impedance attribute and GR curve in the G-4 well (zones with better reservoir properties within the topmost part of Jurassic profile correspond to yellow and red colors); other explanations as in Figure 6



**Rysunek 8.** Przekrój sejsmiczny IL 111 w wersji atrybutu *RMS Amplitude* wraz z profilowaniem GR w otworze G-4; pozostałe objaśnienia jak na rysunku 6

**Figure 8.** Time section IL 111 of RMS Amplitude attribute and GR curve in the G-4 well; other explanations as in Figure 6

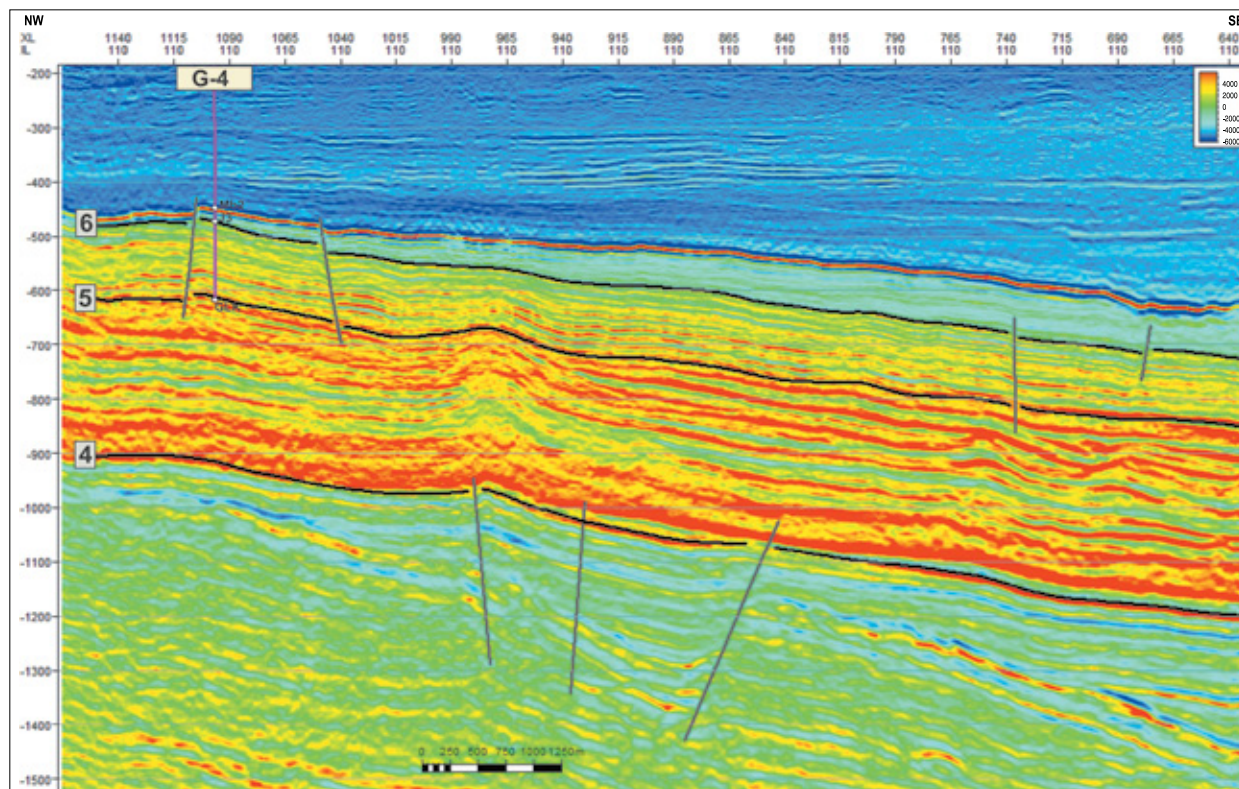


**Rysunek 9.** Przekrój sejsmiczny IL 111 w wersji atrybutu *First Derivative* wraz z profilowaniem GR w otworze G-4; pozostałe objaśnienia jak na rysunku 6

**Figure 9.** Time section IL 111 of the First Derivative attribute and GR curve in the G-4 well; other explanations as in Figure 6

### Inwersja sejsmiczna

Zadaniem inwersji sejsmicznej jest odwzorowanie fizycznej struktury i właściwości ośrodka skalnego na podstawie zarejestrowanego sejsmicznego pola falowego. Inwersja jest cennym narzędziem geofizycznym umożliwiającym estymację parametrów fizycznych ośrodka geologicznego z danych sejsmicznych w postaci zmian impedancji, będących iloczynem gęstości i prędkości propagacji fal. Umożliwia ona przekształcenie



**Rysunek 10.** Przekrój impedancji fali podłużnej IL 110 w wersji czasowej wraz z interpretacją sejsmiczną wybranych horyzontów (według Geofizyki Kraków S.A.): 4 – spąg jury, 5 – granica wewnątrzjurajska, 6 – strop górnej jury i dolnej kredy

**Figure 10.** Time section IL 110 of P wave acoustic impedance with interpretation of selected horizons (by Geofizyka Kraków S.A.): 4 – the bottom of Jurassic, 5 – the intra-Jurassic horizon 6 – the top of Lower Cretaceous – Upper Jurassic complex

amplitudy refleksów sejsmicznych w fizyczne parametry skał, a w konsekwencji – ilościowy opis złoża. Generalnie można ją rozumieć jako wyznaczenie otworowej impedancji akustycznej dla każdej trasy sekcji sejsmicznej. Prędkość propagacji fal sejsmicznych jest jednym z podstawowych parametrów, który to parametr najbardziej wiarygodnie charakteryzuje właściwości fizyczne ośrodka geologicznego (Veeken i Da Silva, 2004; Jędrzejowska-Tyczkowska i Bartoń, 2005).

W niniejszej pracy wykorzystane zostały obliczenia atrybutów na wolumenie inwersji symultanicznej wykonane w Geofizyce Kraków S.A. (Nawieśniak, 2016): impedancja fali podłużnej ( $Z_p$ ), iloczyn stałej Lamégo i gęstości ośrodka ( $\lambda\rho$ ) oraz iloczyn modułu sprężystości poprzecznej i gęstości ośrodka ( $\mu\rho$ ) (rysunki 10–12). Wykresy krzyżowe wymienionych wyżej atrybutów umożliwiają identyfikację zmian w rozkładzie przestrzennym takich parametrów jak porowatość, litologia czy rodzaj nasycenia skały (Ezeh, 2015; Leginowicz, 2016; Balogun i Ehirim, 2017; Ogbamikhumi i Igbiginie, 2020; Kaczmarczyk-Kuszpit, 2021). Podstawy teoretyczne atrybutów obliczonych na podstawie inwersji sejsmicznej zostały szczegółowo przedstawione we wcześniejszym artykule (Bartoń et al., 2022).

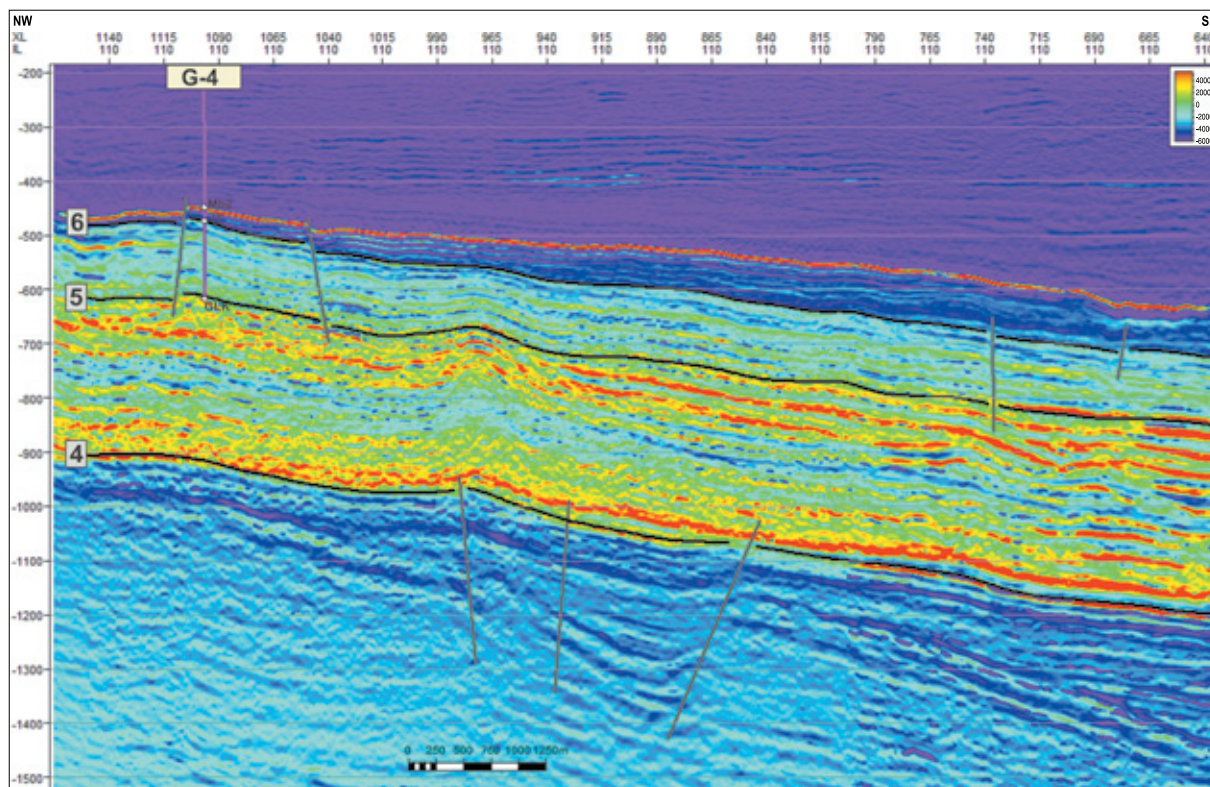
Propagujące w ośrodku geologicznym fale sprężyste rozchodzą się w postaci fal podłużnych (p) oraz fal poprzecznych (s).

Własnością fal podłużnych jest możliwość ich rozchodzenia się w ciałach stałych (matrycy skalnej), w środowiskach płynnych oraz gazowych, co powoduje zmianę ciśnienia wpływającą na lokalne odkształcenia objętości. W przypadku fal poprzecznych ich rozprzestrzenianiu się towarzyszą odkształcenia postaci, skutkujące brakiem ich propagacji w środowiskach płynnych i gazowych. Kombinacje wzajemnych relacji fal podłużnych oraz poprzecznych w połączeniu z gęstością są podstawą do uzyskania parametrów elastycznych w postaci: współczynnika Poissona, modułu odkształcenia objętościowego, modułu odkształcenia postaci, stałej Lamégo oraz modułu Younga. Powyższe współczynniki odgrywają istotną rolę w identyfikacji parametrów złożowych, typów litologicznych skał czy w interpretacji geologiczno-złożowej (Young i Tatham, 2007; Leginowicz, 2016; Adekunle i Chukwuemeka, 2018; Adesanya et al., 2021).

Wyodrębnienie obiektów przestrzennych o lepszych parametrach zbiornikowych na podstawie interpretacji danych sejsmicznych 3D, przy uwzględnieniu danych geofizyki otworowej i badań petrofizycznych, wykonano dla obszaru zlokalizowanego wokół otworu G-4 (rysunek 2).

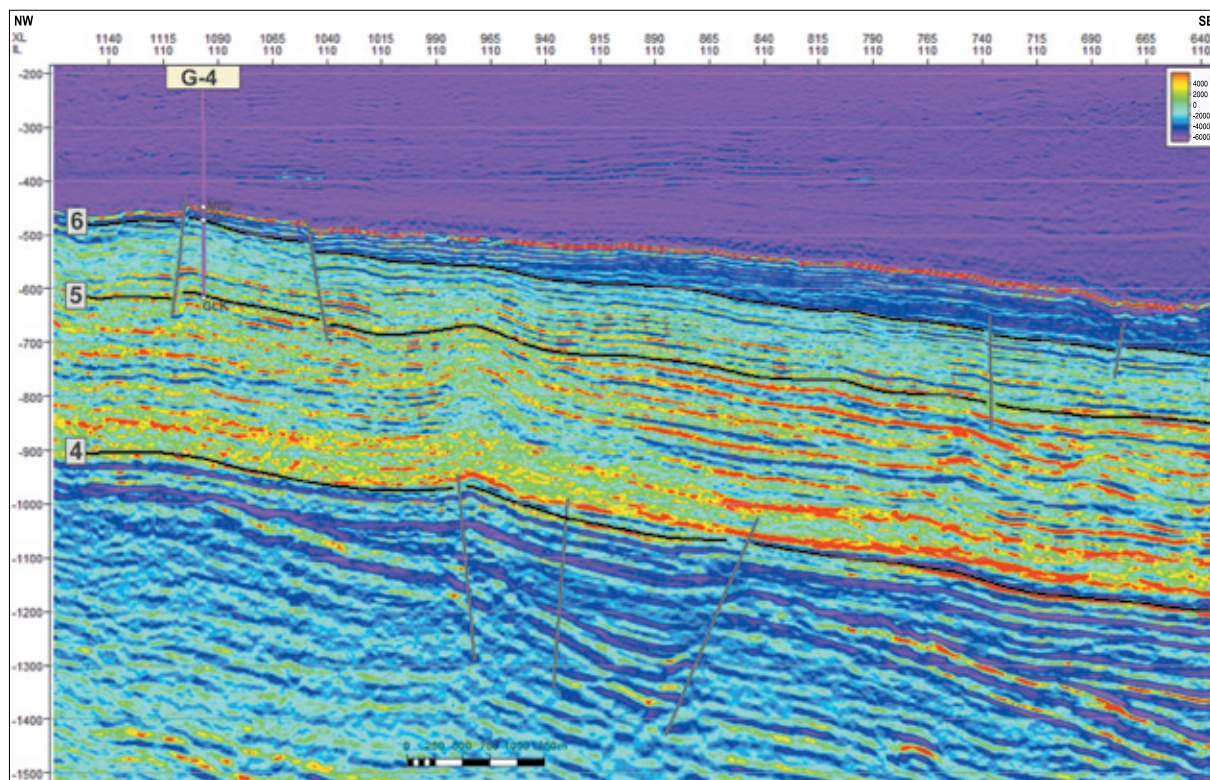
Wybór stref o potencjalnie dobrych właściwościach zbiornikowych oparty był na powszechnie znanych zależnościach fizycznych (Inichinbia et al., 2014; Ezeh, 2015; Muniyitha





**Rysunek 11.** Przekrój sejsmiczny IL 110 w wersji czasowej przedstawiający rozkład atrybutu Lambda-Rho wraz z interpretacją sejsmiczną wybranych horyzontów (według Geofizyki Kraków S.A.); pozostałe objaśnienia jak na rysunku 10

**Figure 11.** Time section IL 110 of the Lambda-Rho attribute with interpretation of selected horizons (Geofizyka Kraków S.A.); other explanations as in Figure 10



**Rysunek 12.** Przekrój sejsmiczny IL 110 w wersji czasowej przedstawiający rozkład atrybutu Mu-Rho wraz z interpretacją sejsmiczną wybranych horyzontów (według Geofizyki Kraków S.A.); pozostałe objaśnienia jak na rysunku 10

**Figure 12.** Time section IL 110 of the Mu-Rho attribute with interpretation of selected horizons (Geofizyka Kraków S.A.); other explanations as in Figure 10

et al., 2019; Ogbamikhumi i Igbinięie, 2020; Kaczmarczyk-Kuszpit, 2021), takie jak:

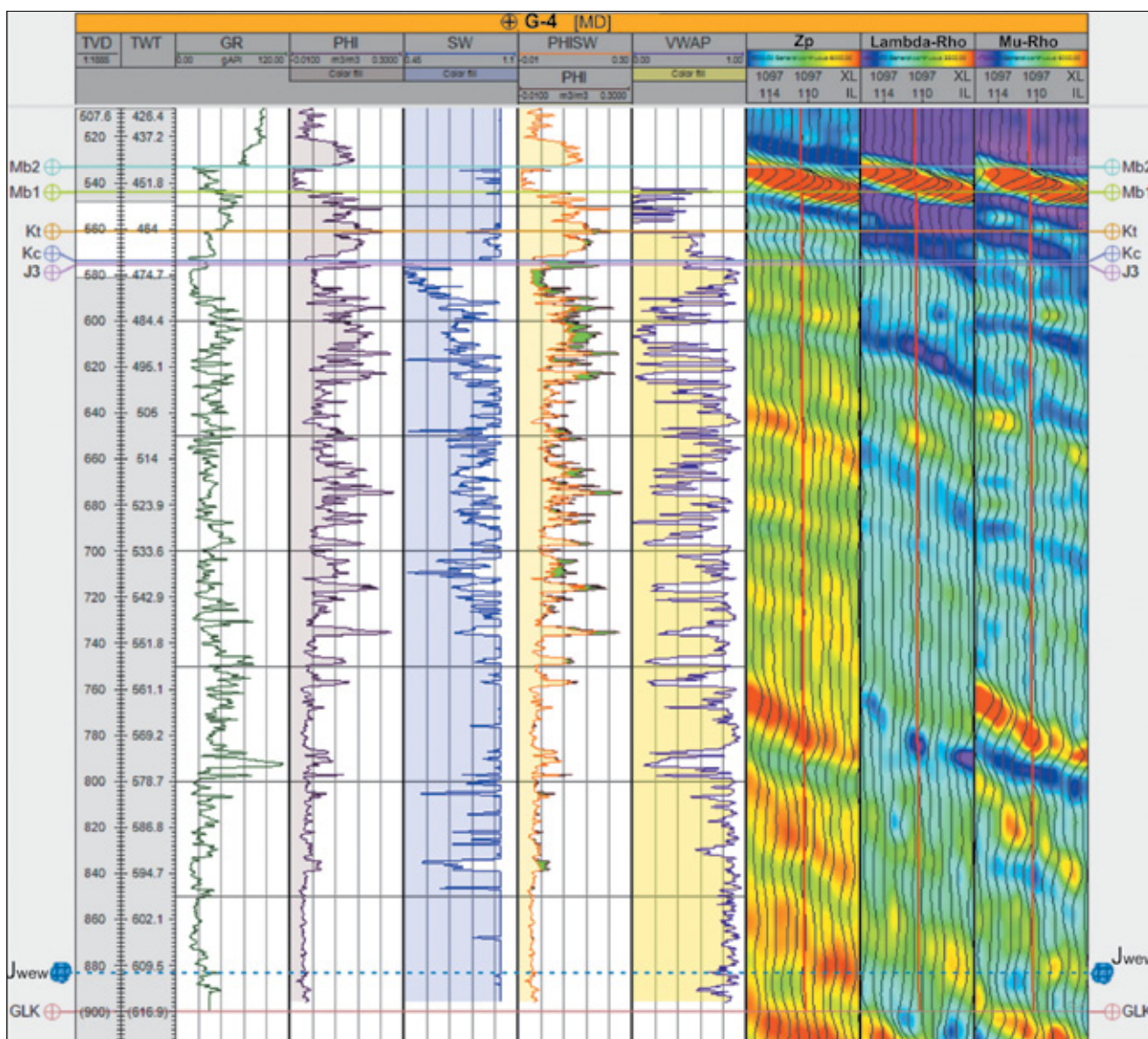
- impedancja fali podłużnej ( $Z_p$ ) – obniżone wartości świadczą o wzroście porowatości, zmianach w litologii oraz nasyceniu gazem (bez uwzględnienia wielkości nasycenia);
- Lambda-Rho ( $\lambda\rho$ ) – obniżone wartości świadczą o wzroście nasycenia węglowodorami i polepszonych właściwościach zbiornikowych;
- Mu-Rho ( $\mu\rho$ ) – obniżone wartości świadczą o polepszonych parametrach zbiornikowych ośrodka skalnego.

Na podstawie powyższych zależności wykonane zostały wykresy krzyżowe atrybutów: impedancja fali podłużnej względem Lambda-Rho ( $Z_p - \lambda\rho$ ) oraz Lambda-Rho względem Mu-Rho ( $\lambda\rho - \mu\rho$ ), które pozwoliły na wyodrębnienie stref o preferowanych parametrach (rysunki 14, 17, 20). Wykorzystany został do tego moduł *Geobody Interpretation*, zawarty w oprogramowaniu Petrel, wraz z opcją *horizon probe*.

Do analiz wybrano bramkę czasową obejmującą interwał od stropu jury do wartości czasu 120 ms poniżej tego horyzontu (rysunek 13).

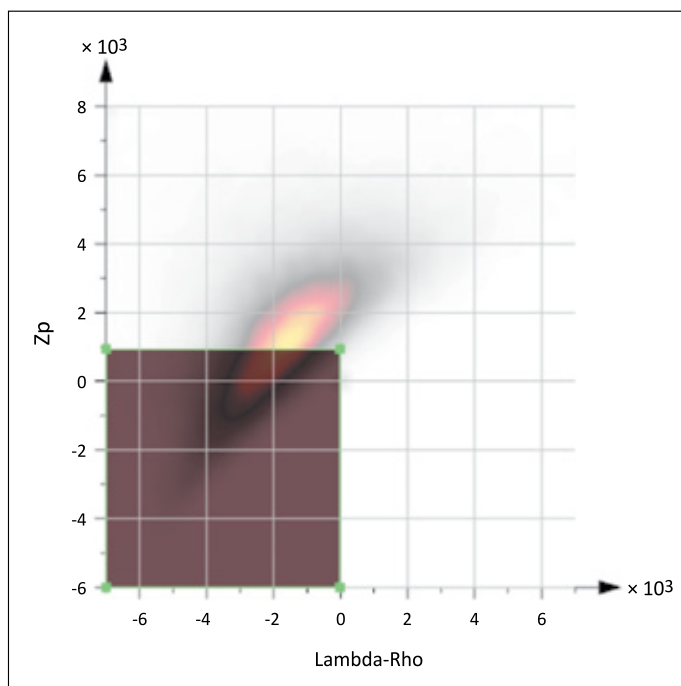
### Zastosowane procedury i wyniki badań

Prezentowane wyniki badań uzyskane zostały dzięki zastosowaniu metodyki opisanej we wcześniejszym artykule (Bartoń et al., 2022) dla sąsiedniego rejonu, usytuowanego około 10 km na południowy wschód od obecnego obszaru badań. W przeciwieństwie do tamtego rejonu w prezentowanym obecnie obszarze w stropowej partii kompleksu węglanowego górnej jury i dolnej kredy dominują wapienie organodetrytyczne oraz biolityty koralowcowe o na ogół dobrych właściwościach zbiornikowych. W obszarze zlokalizowanym wokół analizowanego otworu G-4 identyfikację obiektów o korzystnych parametrach



Rysunek 13. Zestawienie wyników interpretacji petrofizycznej oraz atrybutów  $Z_p$ , Lambda-Rho i Mu-Rho dla otworu G-4

Figure 13. Compilation of petrophysical interpretation and  $Z_p$ , Lambda-Rho and Mu-Rho attributes for G-4 well



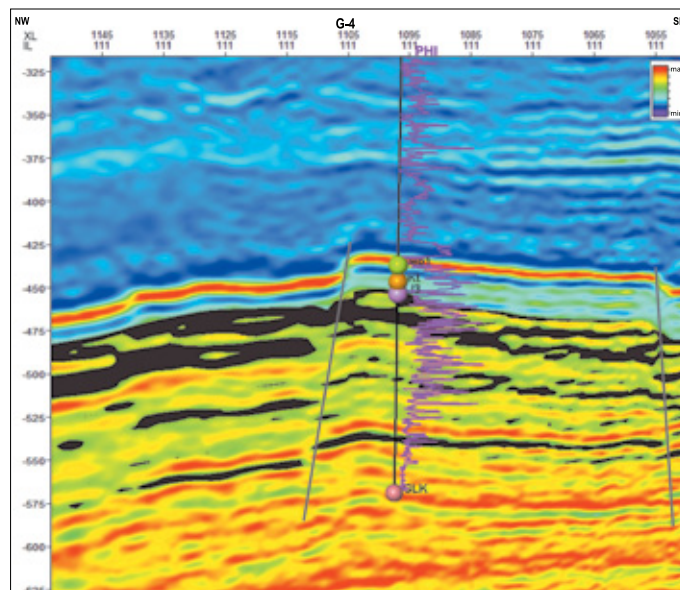
**Rysunek 14.** Wykres krzyżowy atrybutów sejsmicznych impedancji fali podłużnej ( $Z_p$ ) i atrybutu Lambda-Rho wyrażonych w wartościach względnych

**Figure 14.** Cross plot of P-wave acoustic impedance ( $Z_p$ ) versus Lambda-Rho attribute expressed in relative values

zbiornikowych wykonano na podstawie zadanych wartości odcięcia na wykresie krzyżowym atrybutów impedancji fali podłużnej i Lambda-Rho (rysunek 14). Wyboru wyselekcjonowanych wartości z obszaru rozrzutu danych dokonywano interaktywnie, zwracając uwagę na rozkład krzywej porowatości (PHI) w otworze. W wyniku tej selekcji otrzymano strefy o konkretnych wartościach rozważanych parametrów, co przykładowo przedstawiono na tle sekcji sejsmicznej IL 111 (w wersji impedancji fali podłużnej) z naniesioną krzywą porowatości (PHI) dla otworu G-4 (rysunki 15, 16).

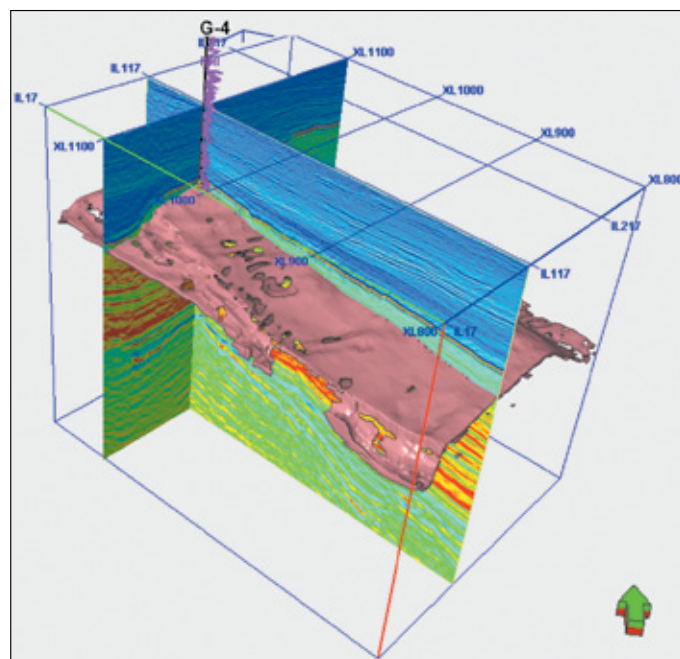
W następnym etapie badań dokonano ekstrakcji stref o korzystnych parametrach zbiornikowych na podstawie zadanych wartości odcięć na wykresie krzyżowym atrybutów Lambda-Rho i Mu-Rho (rysunek 17). Uzyskane wyniki zaprezentowano na tle sekcji sejsmicznej parametru Lambda-Rho (rysunki 18 i 19).

W ostatnim wariancie obliczeń wykorzystano zależności atrybutów Lambda-Rho i Mu-Rho w celu dalszego, bardziej szczegółowego rozróżnienia wydzielonych wcześniej obiektów (rysunki 18 i 19), mając na uwadze właściwości zbiornikowe. W związku z tym na podstawie wykresu krzyżowego atrybutów Lambda-Rho i Mu-Rho wydzielone zostały trzy klasy o zróżnicowanych zakresach wartości rozpatrywanych atrybutów. Analizując wykres krzyżowy atrybutów Lambda-Rho i Mu-Rho (rysunek 20), starano się dobrać wartości odcięć w taki sposób, aby wydzielane klasy odpowiadały generalnie określonym zakresom porowatości na krzywej PHI (rysunek 21). Przestrzenną



**Rysunek 15.** Przekrój sejsmiczny IL 111 impedancji fali podłużnej ( $Z_p$ ) z krzywą porowatości PHI w otworze G-4. Wyodrębnienie stref geologicznych o korzystniejszych parametrach zbiornikowych zaznaczono kolorem czarnym

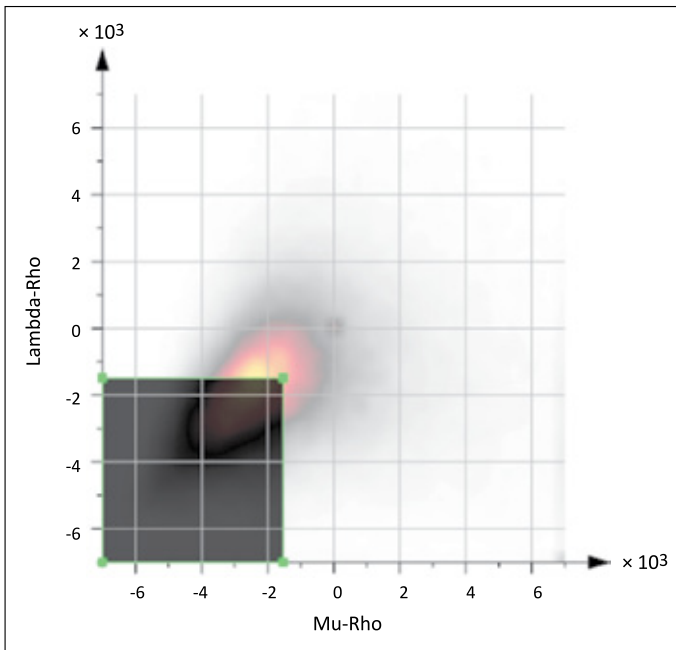
**Figure 15.** Time section IL 111 of P-wave acoustic impedance ( $Z_p$ ) and PHI porosity curve in the G-4 well. Identification of geological zones with better reservoir parameters is marked in black



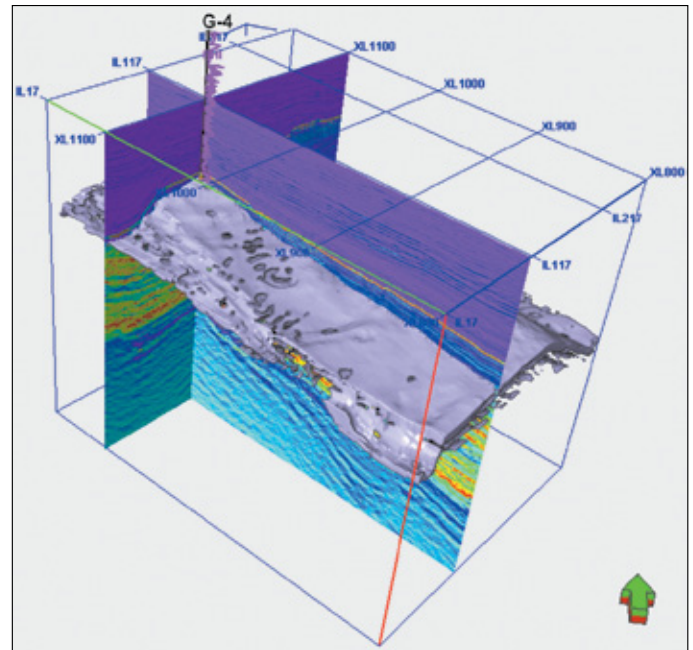
**Rysunek 16.** Przestrzenny widok wydzielonych stref o korzystniejszych parametrach zbiornikowych na tle przekrojów IL 111 i XL 1097 impedancji fali podłużnej ( $Z_p$ )

**Figure 16.** 3D view of zones with better reservoir properties against the time section IL 111 of P-wave impedance ( $Z_p$ )

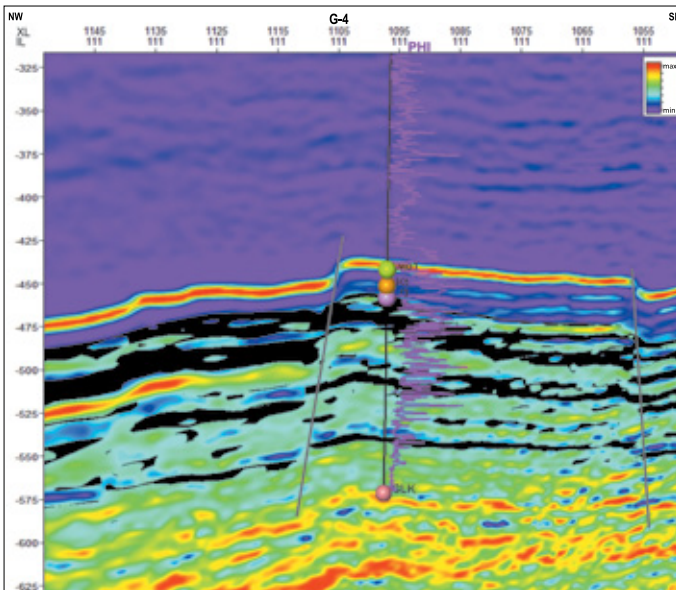
wizualizację wspomnianego podziału na klasy (w postaci *geobody*) przedstawiono na rysunku 22. Natomiast na rysunku 23 wynikowe przekroje *geobody* dla wariantów  $Z_p$  & Lambda-Rho oraz Lambda-Rho & Mu-Rho zestawione zostały z wynikami



**Rysunek 17.** Wykres krzyżowy atrybutów sejsmicznych Lambda-Rho i Mu-Rho, wyrażonych w wartościach względnych  
**Figure 17.** Cross plot of the Lambda-Rho and Mu-Rho seismic attributes, expressed in relative values

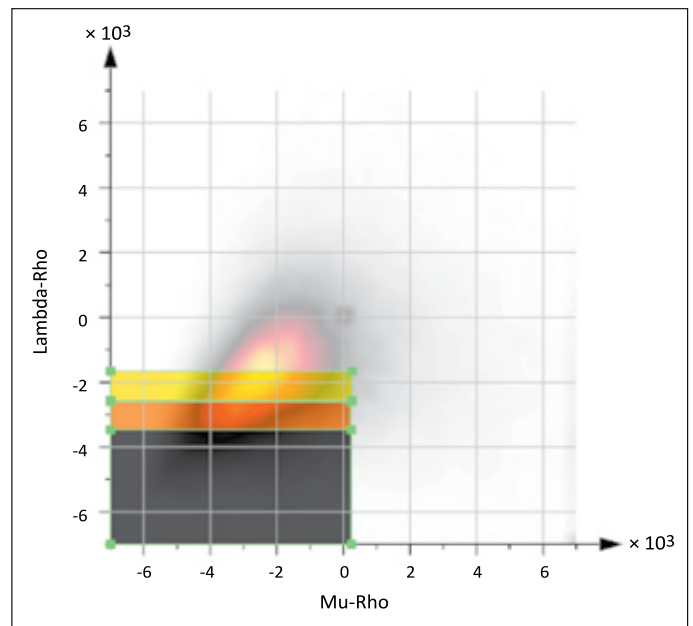


**Rysunek 19.** Przestrzenny widok wydzielonych stref o lepszych własnościach zbiornikowych na tle przekrojów IL 111 i XL 1097 atrybutu Lambda-Rho  
**Figure 19.** 3D view of zones with better reservoir properties against the time section IL 111 of the Lambda-Rho attribute



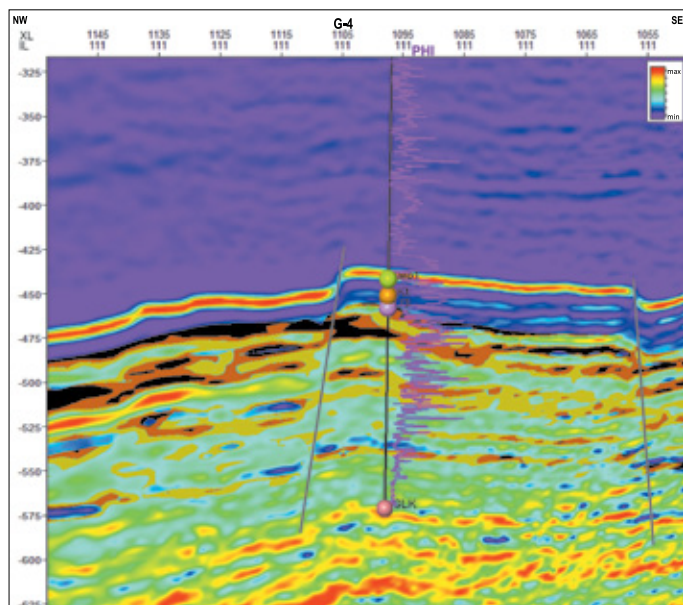
**Rysunek 18.** Przekrój IL 111 atrybutu Lambda-Rho z krzywą porowatości PHI w otworze G-4. Wyodrębnione strefy o korzystniejszych parametrach zbiornikowych zaznaczono kolorem czarnym  
**Figure 18.** Time section IL 111 of the Lambda-Rho attribute with PHI porosity curve in the G-4 well. Zones with better reservoir parameters are highlighted in black

interpretacji petrofizycznej w otworze G-4. Na podstawie tego zestawienia można zauważyć wyraźne różnice w obrazie wyekstrahowanych wartości odpowiadających strefom o lepszych własnościach zbiornikowych. Obiekty *geobody* wydzielone na podstawie korelacji parametrów Lambda-Rho i Mu-Rho



**Rysunek 20.** Wykres krzyżowy atrybutów sejsmicznych Lambda-Rho i Mu-Rho z wyodrębnieniem trzech klas wartości, wyrażonych w wartościach względnych  
**Figure 20.** Cross plot of the Lambda-Rho and Mu-Rho seismic attributes with distribution of three value classes, expressed in relative values

obejmują wyraźnie większą część profilu stropowej partii utworów jury (łączyć się ze sobą w jeden miąższy obiekt) w porównaniu z ciałami wydzielonymi na podstawie korelacji  $Z_p$  i Lambda-Rho, które mają znacznie mniejszą miąższość



**Rysunek 21.** Przekrój IL 111 atrybutu Lambda-Rho z krzywą porowatości PHI w otworze G-4. Wyodrębnienie stref o korzystniejszych parametrach zbiornikowych z podziałem na trzy klasy: klasa 1 (kolor czarny), klasa 2 (kolor brązowy), klasa 3 (kolor oliwkowy)

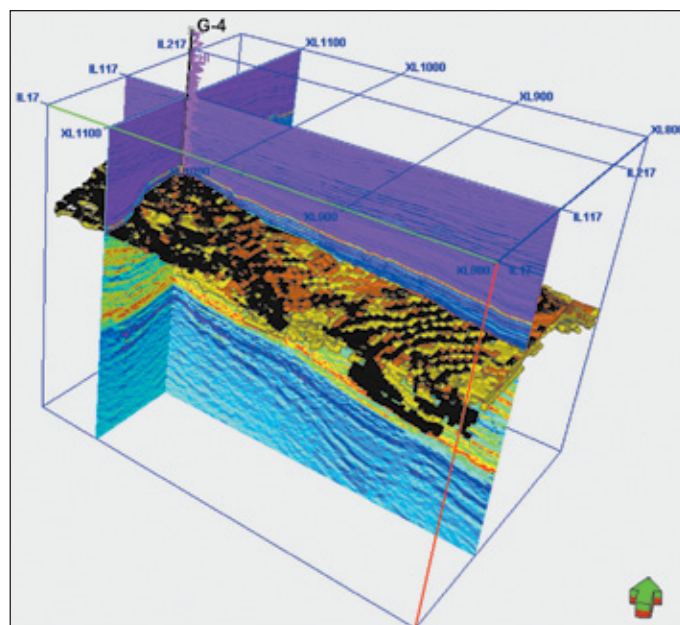
**Figure 21.** Time section IL 111 of the Lambda-Rho attribute with PHI porosity curve in the G-4 well. Identification of zones with better reservoir parameters separated into three classes: Class 1 (black color), Class 2 (brown color), Class 3 (olive color)

i dodatkowo rozdzielone są warstwą o gorszych parametrach zbiornikowych.

Przeprowadzona na podstawie atrybutów obliczonych z inwersji sejsmicznej analiza wykazała, że zgrupowanie stref o lepszych własnościach zbiornikowych znajduje się na północny zachód od analizowanego otworu G-4. Można przypuszczać, że jest to związane z obecnością w tym rejonie regionalnych dyslokacji, wokół których doszło do rozwoju szczelinowatości. Najprawdopodobniej dodatkowym czynnikiem odpowiedzialnym za wzrost porowatości w tej strefie jest powierzchnia krasowa, rozwinięta bezpośrednio w stropie utworów jury. Interpretację różnych form paleokrasu w utworach górnej jury i dolnej kredy opartą na danych otworowych i sejsmicznych przedstawiono w pracach Miziołka i Filara (2019) oraz Miziołka et al. (2022), które obejmują zarówno obszar badań niniejszej pracy, jak i jego sąsiedztwo.

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że najlepsze dopasowanie obrazu na przekrojach sejsmicznych z profilowaniem porowatości (PHI) w otworze G-4 uzyskano dla trzeciego wariantu obliczeń, w którym w obrębie wyodrębnionych stref o lepszych parametrach zbiornikowych wydzielono trzy klasy zakresów wartości, pozwalające w lepszym stopniu zwizualizować zmienność tych parametrów.

Zastosowana metoda, oparta na wykorzystaniu atrybutów: impedancji fali podłużnej ( $Z_p$ ), Lambda-Rho i Mu-Rho,



**Rysunek 22.** Przestrzenny widok wydzielonych trzech klas (horizon probe) w obrębie stref o lepszych własnościach zbiornikowych na tle przekrojów IL 111 i XL 1097 atrybutu Lambda-Rho

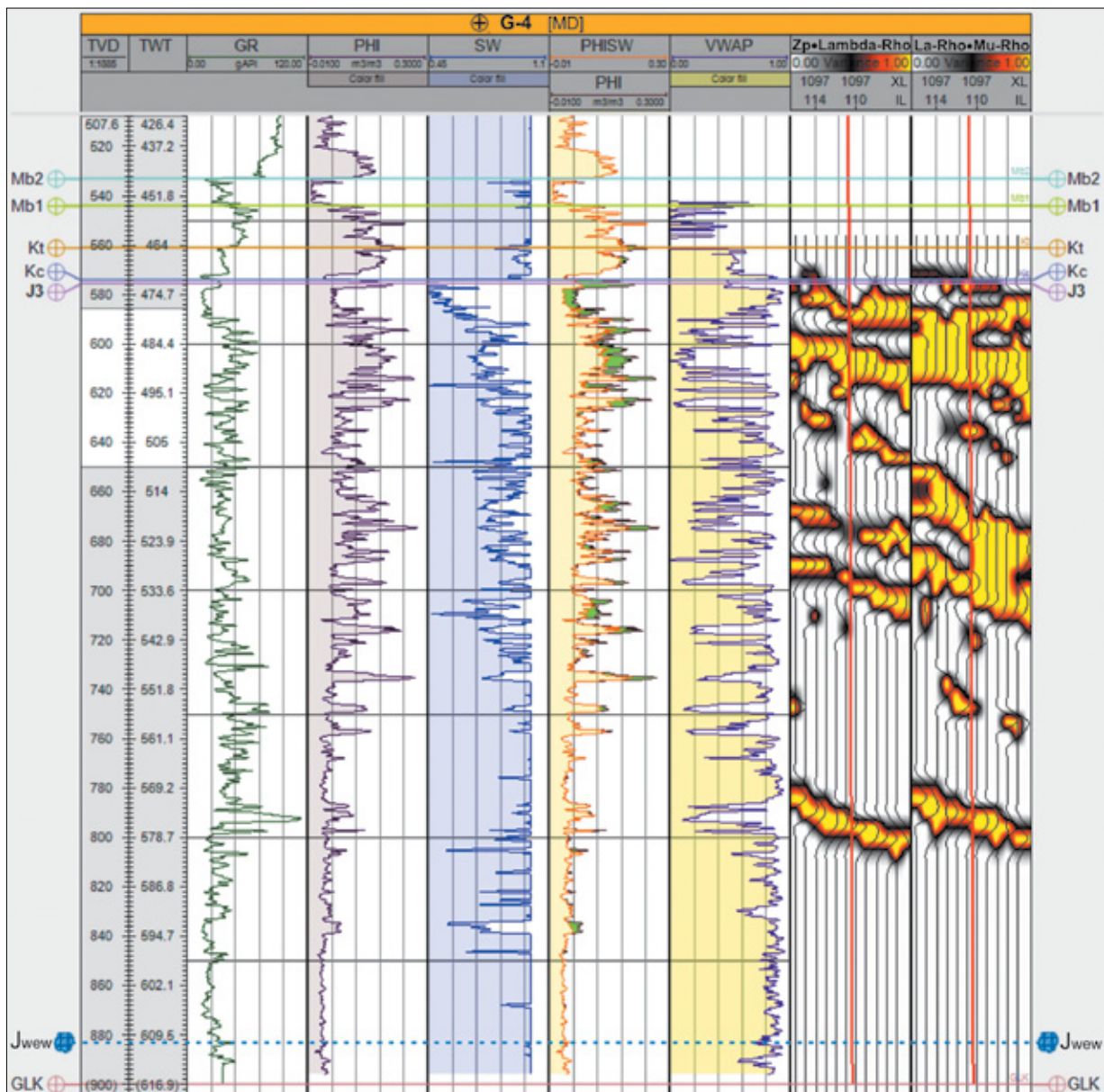
**Figure 22.** 3D view of the separated three classes (horizon probe) within the zones with better reservoir properties against the background of IL 111 and XL 1097 sections of the Lambda-Rho attribute

obliczanych z inwersji sejsmicznej, dała dobre rezultaty w identyfikowaniu stref o lepszych parametrach zbiornikowych w utworach węglanowych. Wykresy krzyżowe konstruowane na bazie tych atrybutów mogą być również zastosowane do innych celów, np. do szczegółowych analiz zmian nasycenia w strefach złóż węglowodorów, gdzie mogą pomóc w rozróżnieniu stref nasyconych solanką i węglowodorami (Young i Tatham, 2007; Adeoti et al. 2018; Muniyithya et al., 2019).

Przedstawiony cykl analiz i obliczeń może znaleźć zastosowanie nie tylko do bezpośredniej identyfikacji poziomów skał zbiornikowych o preferowanych parametrach, ale również może być wykorzystany w procesach modelowania geologiczno-złożowego oraz modelowania systemów naftowych.

## Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawiono wyniki analizy sejsmicznej utworów najwyższej jury z centralnej części przedgórz Karpat w aspekcie identyfikacji obiektów o bardziej korzystnych parametrach zbiornikowych. Dobra jakość zdjęcia sejsmicznego, które cechuje stosunkowo wysoka rozdzielczość w obrębie interpretowanego interwału i duża ciągłość refleksów sejsmicznych, pozwoliła na szczegółowe odtworzenie zróżnicowania parametrów zbiornikowych w stropowej partii kompleksu węglanowego jury górnej. Zróżnicowanie to, będące wynikiem



**Rysunek 23.** Zestawienie wyników interpretacji petrofizycznej z przekrojami *geobody* dla wariantów  $Z_p$  i Lambda-Rho oraz Lambda-Rho i Mu-Rho

**Figure 23.** Comparison of petrophysical interpretation results with geobody sections for  $Z_p$  vs. Lambda-Rho and Lambda-Rho vs. Mu-Rho variants

m.in. zmian facjalnych oraz procesów diagenetycznych, dostrzegalne jest w obrazie atrybutów sejsmicznych (np. *RMS Amplitude, Relative Acoustic Impedance*).

Do identyfikacji stref o lepszych własnościach zbiornikowych wykorzystano wykresy krzyżowe atrybutów pochodzących z inwersji symultanicznej, takich jak: impedancja fali podłużnej, Lambda-Rho, Mu-Rho. Na podstawie wyników przeprowadzonych prób wyodrębnienia wspomnianych wyżej stref stwierdzono, że najlepsze dopasowanie obrazu na przekrojach sejsmicznych z profilowaniem porowatości (PHI) w otworze G-4 uzyskano dla wariantu Lambda-Rho i Mu-Rho ( $\lambda\rho - \mu\rho$ ) z wydzielaniem trzech klas o zróżnicowanych zakresach wartości.

Generalnie obszar o lepszym rozwoju własności zbiornikowych położony jest na północny zachód od otworu G-4, co najprawdopodobniej związane jest z większą ilością dyslokacji w tej strefie, a co za tym idzie – z większym rozwojem szczelinowatości. W porównaniu z analizowanym wcześniej rejonem, usytuowanym około 10 km na SE (Bartoń et al., 2022), w obecnym obszarze badań strefa o lepszych parametrach zbiornikowych usytuowana jest bezpośrednio w przystropowej partii profilu jury górnej, podczas gdy w pierwszym rejonie znajduje się ona około 25 m poniżej powierzchni stropowej kompleksu węglanowego J3+K1. Ponadto wydaje się, że kształty wydzielonych stref są znacznie bardziej urozmaicone, podczas gdy w poprzednim rejonie przebieg powierzchni

tych stref jest zbliżony do przebiegu powierzchni warstwowania osadów.

Wyniki badań wskazują, że utwory węglanowe górnej jury i dolnej kredy w środkowej części przedgórze Karpat mają zróżnicowane parametry zbiornikowe. Szczególnie w stropowej części tego kompleksu występują strefy o wyraźnie lepszych własnościach zbiornikowych.

Zastosowanie wykresów krzyżowych atrybutów obliczanych z inwersji sejsmicznej pozwoliło na wyodrębnienie stref o lepszych parametrach zbiornikowych w analizowanych utworach. Metodyka ta może znaleźć zastosowanie nie tylko do bezpośredniej identyfikacji poziomów skał zbiornikowych o preferowanych parametrach, ale może być też szeroko wykorzystana w różnego typu analizach i modelowaniach przestrzennych.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Identyfikacja perspektywicznych obiektów geologicznych w formacji węglanowej jury górnej do potencjalnego składowania CO<sub>2</sub>*, praca INiG – PIB; nr zlecenia 0045/SR/2021, nr archiwalny DK-4100-0033/2021.

## Literatura

- Adekunle S., Chukwuemeka E., 2018. Cross Plot Analysis of Extracted Seismic Inversion Attributes for Fluid and Lithology Discrimination: A Case Study of K-Field, Onshore Niger Delta Area, Nigeria. *International Journal of Science and Research*, 7(4): 804–810. DOI: 10.21275/ART20181606.
- Adeoti L., Allo O.J., Ayolabi E.A., Akinmosin A., Oladele S., Oyeniran T., Ayuk M.A., 2018. Reservoir fluid determination from angle stacked seismic volumes in 'Jay' field, Niger Delta, Nigeria. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 22(4): 453–458. DOI: 10.4314/jasem.v22i4.2.
- Adesanya O.Y., Adeoti L., Oyedele K.F., Afinotan I.P., Oyeniran T., Alli S., 2021. Hydrocarbon reservoir delineation using simultaneous and elastic impedance inversions in a Niger Delta field. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 11: 2891–2904. DOI: 10.1007/s13202-021-01191-5.
- Azevedo L., Pereira G.R., 2009. Seismic attributes in hydrocarbon reservoir characterization. *Wyd. Universidade de Aveiro, Departamento de Geociencias, Aveiro*: 1–165.
- Balogun A.O., Ehirim C.N., 2017. Lithology and Fluid Discrimination Using Bulk Modulus and Mu-Rho Attributes Generated from Extended Elastic Impedance. *International Journal of Science and Research*, 6 (10):639–643. DOI: 10.21275/19091705.
- Bartoń R., Urbaniec A., 2018. Wykorzystanie pomiarów PPS do uszczegółowienia interpretacji sejsmicznej 3D na przykładzie utworów dolnego paleozoiku. *Nafta-Gaz*, 74(9): 655–668. DOI: 10.18668/NG.2018.09.04.
- Bartoń R., Urbaniec A., Filipowska-Jeziorek K., 2022. Metodyka identyfikacji obiektów perspektywicznych do potencjalnego składowania CO<sub>2</sub> na przykładzie utworów węglanowych jury górnej. *Nafta-Gaz*, 78(5): 343–357. DOI: 10.18668/NG.2022.05.03.
- Buła Z., Habryn R. (red.), 2008. Atlas geologiczno-strukturalny paleozoicznego podłoża Karpat zewnętrznych i zapadliska przedkarpackiego; 1 : 300 000. *Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa*.
- Chopra S., Marfurt K., 2007. Seismic attributes for prospect identification and reservoir characterization. *Geophysical Developments No. 11, SEG Geophysical Developments, Society of Exploration Geophysicists*.
- Ezeh C.C., 2015. Using Lamé's petrophysical parameters for fluid detection and lithology determination in parts of Niger Delta. *Global Journal of Geological Sciences*, 13: 23–33. DOI: 10.4314/gjgs.v13i1.4.
- Ferguson C.J., Avu A., Schofield N., Paton G.S., 2010. Seismic analysis workflow for reservoir characterization in the vicinity of salt. *First Break*, 28: 107–113.
- Frankowicz E., 2008. Wykorzystanie atrybutów sejsmicznych w interpretacji strukturalnej na przykładzie zdjęcia sejsmicznego 3D ZOCA-2 (basen Bonaparte, NW szelf Australii). *Przegląd Geologiczny*, 56(8/2): 780–786.
- Gliniak P., Laskowicz R., Urbaniec A., Leśniak G., Such P., 2004. The facies development and reservoir properties in Late Jurassic carbonate sediments in the central Carpathian foreland. [W:] Swennen R., Roure F., Granath J.W. (eds.). *Deformation, fluid flow and reservoir appraisal in foreland fold and thrust belts. AAPG Hedberg Series*, 1: 347–355.
- Gliniak P., Laskowicz R., Urbaniec A., Such P., Leśniak G., 2002. Factors affecting reservoir properties of the Upper Jurassic and the Lower Cretaceous carbonate rocks in the central part of the Carpathian Foreland. *AAPG Hedberg Conference, Palermo-Mondello*. Abstract: <[http://www.searchanddiscovery.com/pdf/abstracts/pdf/2002/hedberg\\_sicily/ndx\\_gliniak02.pdf.html](http://www.searchanddiscovery.com/pdf/abstracts/pdf/2002/hedberg_sicily/ndx_gliniak02.pdf.html)> (dostęp: 12.09.2022).
- Gutowski J., Urbaniec A., Złonkiewicz Z., Bobrek L., Świetlik B., Gliniak P., 2007. Stratygrafia górnej jury i dolnej kredy środkowej części przedpola polskich Karpat. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 426: 1–26.
- Inichinbia S., Sule P.O., Ahmed A.L., Hamza H., Omudu L.M., 2014. Fluid and lithology discrimination of Amangi hydrocarbon field of the Niger Delta using Lambda-Mu-Rho technique. *IOSR Journal of Applied Geology and Geophysics*, 2(2): 01–07. DOI: 10.9790/0990-02220107.
- Jachowicz-Zdanowska M., 2011. Organic microfossil assemblages from the late Ediacaran rocks of the Małopolska Block, southeastern Poland. *Geological Quarterly*, 55(2): 85–94.
- Jasionowski M., 1997. Zarys litostratygrafii osadów miocenijskich wschodniej części zapadliska przedkarpackiego. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 375: 43–60.
- Jawor E., 1970. Węglana budowa geologiczna na wschód od Krakowa. *Acta Geologica Polonica*, 20(4): 715–769.
- Jędrzejowska-Tyczkowska H., Bartoń R., 2005. Współczesne możliwości metody sejsmicznej w zadaniach ilościowej charakterystyki obiektów złożowych. *Nafta-Gaz*, 61(7–8): 349–356.
- Kaczmarczyk-Kuszpit W., 2021. Reservoir characterization based on the Lambda-Mu-Rho method – case study. *Nafta-Gaz*, 77(10): 625–632. DOI: 10.18668/NG.2021.10.01.
- Leginowicz A., 2016. Identyfikacja sweet spotów w poszukiwaniach złóż niekonwencjonalnych. *Nafta-Gaz*, 72(4): 223–229. DOI: 10.18668/NG.2016.04.01.
- Miziołek M., Filar B., 2019. Paleokras w utworach górnej jury podłoża zapadliska przedkarpackiego i jego znaczenie złożowe. *Nafta-Gaz*, 75(6): 330–344. DOI: 10.18668/NG.2019.06.04.
- Miziołek M., Filipowska-Jeziorek K., Urbaniec A., Filar B., Łaba-Biel A., 2022. Możliwości identyfikacji stref rozwoju paleokrasu w rejonie przedgórze Karpat na podstawie danych otworowych i sejsmicznych. *Nafta-Gaz*, 78(7): 485–502. DOI: 10.18668/NG.2022.07.01.
- Moryc W., 1996. Budowa geologiczna podłoża miocenu w rejonie Pilzno–Dębica–Sędziszów Małopolski. *Nafta-Gaz*, 52(12): 521–550.
- Moryc W., 2006a. Budowa geologiczna podłoża miocenu w rejonie Kraków–Pilzno. Część I. Prekambr i paleozoik (bez permu). *Nafta-Gaz*, 62(5): 197–216.

- Moryc W., 2006b. Budowa geologiczna podłoża miocenu w rejonie Kraków–Pilzno. Część II. Perm i mezozoik. *Nafta-Gaz*, 62(6): 263–282.
- Moryc W., 2014. Perm i trias przedgórza Karpat polskich. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 457: 43–67.
- Moryc W., Jachowicz M., 2000. Utwory prekambryjskie w rejonie Bochnia–Tarnów–Dębica. *Przegląd Geologiczny*, 48(7): 601–606.
- Moryc W., Nehring-Lefeld M., 1997. Ordovician between Pilzno and Busko in the Carpathian Foreland (Southern Poland). *Geological Quarterly*, 41(2): 139–150.
- Munyithya J.M., Ehirim Ch.N., Dagogo T., 2019. Rock Physics Models and Seismic Inversion in Reservoir Characterization, “MUN” Onshore Niger Delta Field. *International Journal of Geosciences*, 10(11): 981–994. DOI: 10.4236/ijg.2019.1011056.
- Nawieśniak E. (kierownik zespołu), 2016. Dokumentacja wyników badań sejsmicznych, Temat: Przetwarzanie i interpretacja danych sejsmicznych 3D, rok 2015. *Archiwum PGNiG S.A., Warszawa*.
- Ogbamikhumi A., Igbini N.S., 2020. Rock physics attribute analysis for hydrocarbon prospectivity in the Eva field onshore Niger Delta Basin. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 10: 3127–3138. DOI: 10.1007/s13202-020-00975-5.
- Pigott J.D., Kang M.-H., Han H.-Ch., 2013. First order seismic attributes for clastic seismic facies interpretation: Examples from the East China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 66: 34–54. DOI: 10.1016/j.jseaes.2012.11.043.
- Rosa M.C., Vincentelli M.G.C., 2017. Seismic Attribute analysis in carbonate reservoir physical properties distribution: Neobarremian-Eoaptian coquina reservoir case. *15<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro, Brazil*, 31.07–03.08.2017. DOI: 10.1190/sbgf2017-053.
- Sarhan M.A., 2017. The efficiency of seismic attributes to differentiate between massive and non-massive carbonate successions for hydrocarbon exploration activity. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 6: 311–325. DOI: 10.1016/j.nrjag.2017.06.003.
- Torrado L., Mann P., Bhattacharya J., 2014. Application of seismic attributes and spectral decomposition for reservoir characterization of a complex fluvial system: Case study of the Carbonera Formation, Llanos foreland basin, Colombia. *Geophysics*, 79(5): B221–B230. DOI: 10.1190/geo2013-0429.1.
- Urbaniec A., 2021. Charakterystyka litofacjalna utworów jury górnej i kredy dolnej w rejonie Dąbrowa Tarnowska – Dębica w oparciu o interpretację danych sejsmicznych i otworowych. *Prace Naukowe Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego*, 232: 1–240. DOI: 10.18668/PN2021.232.
- Urbaniec A., Bartoń R., Bajewski Ł., Wilk A., 2020. Wyniki interpretacji strukturalnej utworów triasu i paleozoiku przedgórza Karpat opartej na nowych danych sejsmicznych. *Nafta-Gaz*, 76(9): 559–568. DOI: 10.18668/NG.2020.09.01.
- Urbaniec A., Bobrek L., Świetlik B., 2010. Litostratygrafia i charakterystyka mikropaleontologiczna utworów kredy dolnej w środkowej części przedgórza Karpat. *Przegląd Geologiczny*, 58(12): 1161–1175.
- Urbaniec A., Łaba-Biel A., Kwietniak A., Fashagba I., 2021. Seismostratigraphic Interpretation of Upper Cretaceous Reservoir from the Carpathian Foreland, Southern Poland. *Energies*, 14(22): 7776. DOI: 10.3390/en14227776.
- Urbaniec A., Stadtmüller M., Bartoń R., 2019. Possibility of a more detailed seismic interpretation within the Miocene formations of the Carpathian Foredeep based on the well logs interpretation. *Nafta-Gaz*, 75(9): 527–544. DOI: 10.18668/NG.2019.09.02.
- Veeken P.C.H., Da Silva M., 2004. Seismic inversion methods and some of their constraints. *First Break*, 22(6): 15–38. DOI: 10.3997/1365-2397.2004011.
- Young K.T., Tatham R.H., 2007. Lambda-mu-rho inversion as a fluid and lithology discriminator in the Columbus Basin, offshore Trinidad. SEG Technical Program Expanded Abstracts 2007; *Society of Exploration Geophysicists*: 214–218. DOI: 10.1190/1.2792413.
- Zając R., 1984. Stratygrafia i rozwój facjalny dewonu i dolnego karbonu południowej części podłoża zapadliska przedkarpacciego. *Kwartalnik Geologiczny*, 28(2): 291–316.
- Żelaźniewicz A., Aleksandrowski P., Buła Z., Karnkowski P.H., Konon A., Oszczytko N., Ślęczka A., Żaba J., Żytko K. (2011): Regionalizacja tektoniczna Polski. *Wyd. Komitet Nauk Geologicznych PAN, Wrocław*.



Dr Andrzej URBANIEC  
 Adiunkt; kierownik Zakładu Sejsmiki  
 Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
 ul. Lubicz 25 A  
 31-503 Kraków  
 E-mail: [andrzej.urbaniec@inig.pl](mailto:andrzej.urbaniec@inig.pl)



Dr inż. Robert BARTOŃ  
 Adiunkt w Zakładzie Sejsmiki  
 Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
 ul. Lubicz 25 A  
 31-503 Kraków  
 E-mail: [robert.barton@inig.pl](mailto:robert.barton@inig.pl)



Inż. Kinga FILIPOWSKA-JEZIOREK  
 Główny specjalista inżynierijno-techniczny  
 w Zakładzie Sejsmiki  
 Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
 ul. Lubicz 25 A  
 31-503 Kraków  
 E-mail: [kinga.filipowska-jeziorek@inig.pl](mailto:kinga.filipowska-jeziorek@inig.pl)