

## Metodyka identyfikacji obiektów perspektywicznych do potencjalnego składowania CO<sub>2</sub> na przykładzie utworów węglanowych jury górnej

### Methodology of prospective objects identification for potential CO<sub>2</sub> storage based on the example of Upper Jurassic carbonate formations

Robert Bartoń, Andrzej Urbaniec, Kinga Filipowska-Jeziorek

*Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

**STRESZCZENIE:** Celem artykułu jest opracowanie metodyki pozwalającej na wyodrębnienie stref/obiektów geologicznych o korzystniejszych własnościach petrofizycznych na podstawie analizy danych sejsmicznych i otworowych. Do badań tych wykorzystano zdjęcie sejsmiczne 3D z obszaru środkowej części przedgórza Karpat, a szczegółowe analizy prowadzono w obrębie stropowej partii kompleksu węglanowego górnej jury i dolnej kredy. W artykule przedstawiono wyniki analiz przeprowadzonych w obrębie centralnej części wspomnianego wyżej zdjęcia sejsmicznego. Wyodrębnienie obiektów przestrzennych do potencjalnej sekwestracji CO<sub>2</sub> było realizowane na podstawie atrybutów sejsmicznych obliczonych z inwersji symultanicznej. Inwersja sejsmiczna jest cennym narzędziem umożliwiającym estymację parametrów fizycznych ośrodka geologicznego z danych sejsmicznych, gdyż pozwala ona na przekształcenie amplitudy refleksów sejsmicznych w fizyczne parametry skał, a w konsekwencji w ilościowy opis złoża. Prędkość propagacji fal sejsmicznych jest jednym z podstawowych parametrów, który najbardziej wiarygodnie charakteryzuje właściwości fizyczne ośrodka geologicznego. Wykonane zostały wykresy krzyżowe atrybutów impedancji fali podłużnej względem Lambda-Rho ( $Z_p - \lambda\rho$ ) oraz Lambda-Rho względem Mu-Rho ( $\lambda\rho - \mu\rho$ ), które w najlepszym stopniu odzwierciedlały zależności pomiędzy parametrami sprężystymi i elastycznymi. W obliczeniach wykorzystano opcję *horizon probe* dostępną w module *Geobody Interpretation* oprogramowania Petrel. Obliczenia prowadzono dla bramki czasowej obejmującej interwał od wyinterpretowanego horyzontu sejsmicznego odpowiadającego stropowi jury górnej wraz z dolną kredą (J3+K1str) do wartości czasu 120 ms poniżej tego horyzontu. Opracowana metodyka może znaleźć w przyszłości zastosowanie zarówno do rozpoznawania stref o korzystniejszych parametrach zbiornikowych, jak również do bardziej zaawansowanych procesów budowy modeli statycznych i dynamicznych analizowanych formacji skalnych. Wyznaczone obiekty po przeprowadzeniu niezbędnych analiz oraz modelowań mogą zostać wykorzystane do potencjalnego składowania CO<sub>2</sub>.

**Słowa kluczowe:** sekwestracja CO<sub>2</sub>, identyfikacja obiektów, inwersja sejsmiczna, atrybuty sejsmiczne, wykresy krzyżowe.

**ABSTRACT:** The aim of this paper is to develop a methodology to identify geological zones/objects with more favorable petrophysical properties based on analysis of seismic and well data. For these studies 3D seismic image from the middle part of the Carpathian Foreland was used, and detailed analyses were carried out within the top part of the Upper Jurassic and Lower Cretaceous carbonate complex. This paper presents results of performed analysis in the central part of the above-mentioned seismic image. Identification of spatial objects for potential CO<sub>2</sub> sequestration was realized on the basis of seismic attributes calculated from simultaneous inversion. Seismic inversion is a useful tool for the estimation of reservoir properties from seismic data, as it enables the transformation of amplitude of seismic reflections into physical parameters of rocks and, consequently, into a quantitative description of the reservoir. Propagation of velocity seismic waves is one of the basic parameters that most reliably characterizes the physical properties of a geological medium. Cross plots of longitudinal wave impedance attributes versus Lambda-Rho ( $Z_p - \lambda\rho$ ) and Lambda-Rho versus Mu-Rho ( $\lambda\rho - \mu\rho$ ) were made, which best represented the relationships of the elastic parameters. The horizon probe option available in Geobody Interpretation module of Petrel software was used to perform calculations. A time gate covering the interval from the interpreted seismic horizon corresponding to the Upper Jurassic – Lower Cretaceous top (J3+K1str) to the time value of 120 ms below this horizon was adopted. The developed methodology can be applied in the future both for identification of the zones of better reservoir parameters as well as for more advanced processes of static and dynamic models building for the analyzed rock formations. After conducting necessary analyses and modeling the identified objects can be used for potential CO<sub>2</sub> storage.

**Key words:** CO<sub>2</sub> sequestration, geobody identification, seismic inversion, seismic attributes, cross plots.

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

Artykuł nadesłano do Redakcji: 04.01.2022 r. Zatwierdzono do druku: 04.05.2022 r.

## Wstęp

Zakres problematyki związanej z zagadnieniem sekwestracji CO<sub>2</sub> jest bardzo szeroki – obejmuje metody wychwytywania CO<sub>2</sub>, transport, miejsce podziemnego składowania, zatłaczanie wraz z monitoringiem obiektu oraz aspekty ekonomiczne. Przy wyborze lokalizacji do składowania CO<sub>2</sub> w strukturach geologicznych rozpatruje się kryteria geologiczne i złożowe, w tym zwłaszcza parametry zbiornikowe, jakość uszczelnienia, głębokość zalegania obiektu, temperaturę, ciśnienie, potencjalną pojemność składowania CO<sub>2</sub> oraz jego oddziaływanie na skały i wody podziemne (Tarkowski, 2005; Arora et al., 2019; Davis et al., 2019; Li et al., 2021).

W publikacji zaprezentowano badania, które dotyczyły identyfikacji stref o korzystniejszych parametrach zbiornikowych do podziemnego składowania CO<sub>2</sub>. Badania wyodrębnienia stref/obiektów geologicznych o korzystnych własnościach petrofizycznych, przy wykorzystaniu danych sejsmicznych i otworowych, zostały wykonane w utworach węglanowych jury górnej i kredy dolnej. Do badań wytypowano zdjęcie sejsmiczne 3D zlokalizowane w centralnej części przedgórza Karpat, w strefie cechującej się obecnością różnego typu pułapek złożowych, zawierających akumulacje węglowodorów. Wyodrębnienie obiektów przestrzennych odpowiednich do potencjalnej sekwestracji CO<sub>2</sub> w analizowanych utworach węglanowych było realizowane na podstawie interpretacji atrybutów impedancji fali podłużnej ( $Z_p$ ), iloczynu gęstości i stałej Lamégo ( $\lambda\rho$ ) oraz iloczynu gęstości i modułu sprężystości ( $\mu\rho$ ), obliczonych z inwersji symultanicznej. Do szczegółowej analizy parametrów petrofizycznych wybrano otwór O-1, stanowiący punkt odniesienia do kalibracji uzyskiwanych wyników. Obliczenia wykonano przy użyciu oprogramowania Petrel firmy Schlumberger.

Podobne prace dotyczące identyfikacji typów litologicznych oraz stref o polepszonych parametrach złożowych były realizowane głównie na danych otworowych, m.in. przez naukowców z różnych krajów (Munyithya et al., 2019; Ogbamikhumi i Igbinię, 2020; Kaczmarczyk-Kuszpit, 2021). Niniejsza publikacja prezentuje identyfikację tego typu stref na podstawie analizy atrybutów sejsmicznych obliczonych z inwersji symultanicznej, z ukierunkowaniem na przestrzenne ich wydzielenie i ekstrapolację trójwymiarowych obiektów o konkretnych parametrach (ang. *geobody*).

## Charakterystyka geologiczna rejonu badań

Obszar badań usytuowany jest w centralnej części zapadliśka przedkarpackiego, a w odniesieniu do najstarszych pięter strukturalnych, które stanowi seria anchimetamorficznych skał

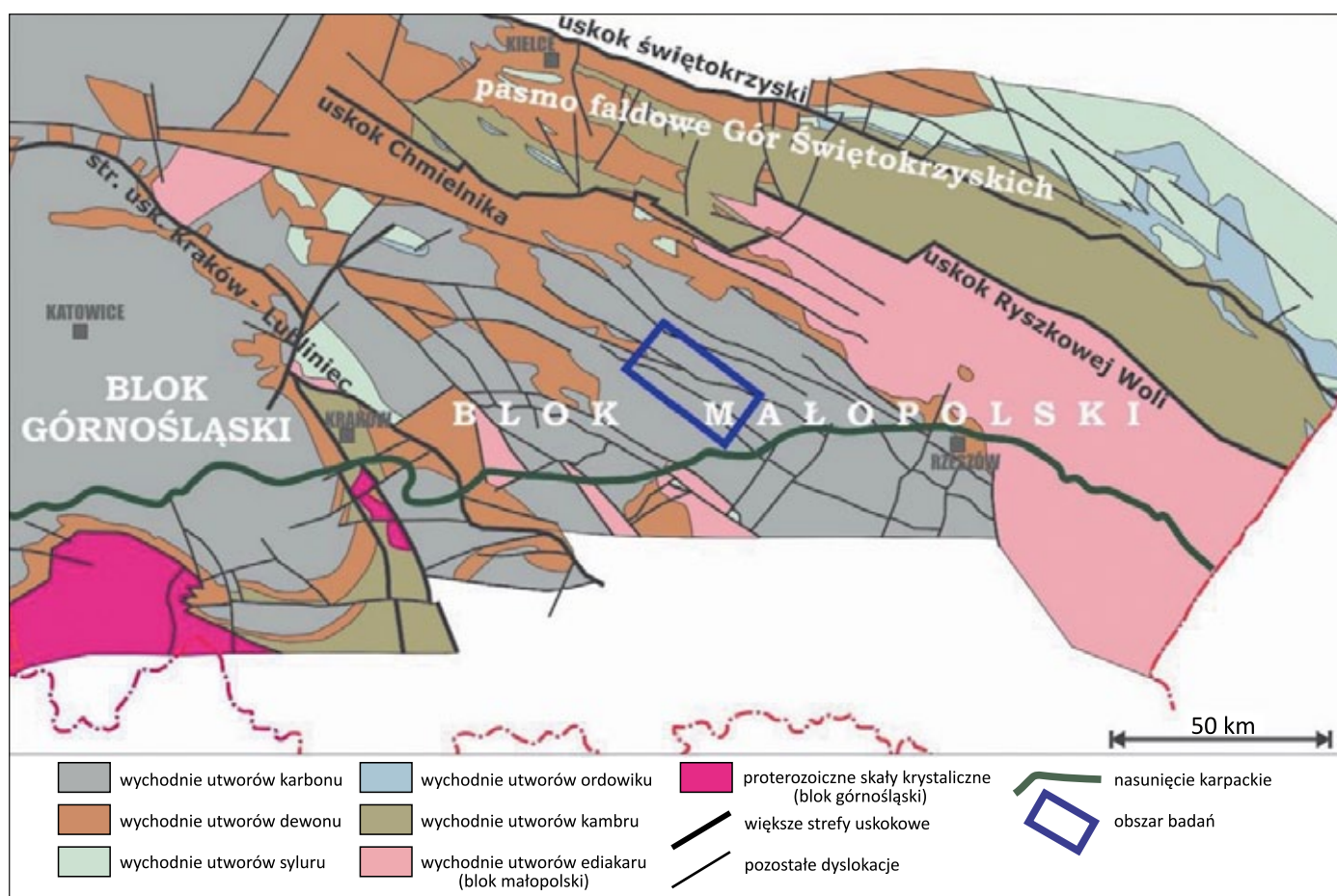
datowanych na wiek późnoediakarski (Moryc i Jachowicz, 2000; Buła et al., 2008; Żelaźniewicz et al., 2009; Jachowicz-Zdanowska, 2011), na obszarze bloku małopolskiego (rysunek 1).

**Utwory dolnego paleozoiku**, reprezentowane w rejonie badań przez węglanowe i klastyczne skały ordowickie oraz silikoklastyczne utwory syluru, zostały bardzo słabo rozpoznane wiertniczo, podobnie jak utwory neoproterozoiku.

Ilasto-piaszczyste utwory **dolnego dewonu** charakteryzują się w tym obszarze lokalnym zasięgiem oraz niewielkimi miąższościami, osiągającymi kilkanaście metrów. Określenie relacji wiekowych utworów kompleksu węglanowego zaliczanego do **środkowo-górnego dewonu i dolnego karbonu** jest w omawianym rejonie bardzo problematyczne ze względu na brak szczegółowych datowań biostratygraficznych. W niektórych obszarach przedgórza wykazano, iż kompleks utworów węglanowo-klastycznych, leżący bezpośrednio ponad utworami dolnego dewonu, jest wieku fameńskiego (Świetlik, 2013). W profilu utworów dolnego karbonu (rozpoznanych w obszarze badań m.in. w otworach ND-3 i O-1) przeważają wapienie i dolomity, lokalnie z wkładkami margli lub utworów marglisto-ilastych.

**Pstry piaskowiec dolny i środkowy** rozwinięty jest w postaci serii utworów klastycznych, ilasto-piaszczystych, a lokalnie zlepieńcowatych. Seria utworów **retu (górnego pstręgo piaskowca)** reprezentowana jest głównie przez osady marglisto-wapienne z wtrąceniami skał siarczanowych, a ze względu na podobne wykształcenie litologiczne i brak możliwości rozdzielenia w profilach otworów wiertniczych utwory te łączone są zazwyczaj w jeden kompleks litostratygraficzny z osadami **wapienia muszlowego** (Urbaniec et al., 2013). W obszarze badań ponad utworami triasu zalegają bezpośrednio utwory **górnego keloweju** (Moryc, 2018), wykształcone jako czerwone wapienie, często zapiaszczone, z nieregularnymi porwakami skał węglanowych.

Węglanowy kompleks utworów **jury górnej** tworzy na obszarze przedgórza Karpat zwartą pokrywę, reprezentując piętra od oksfordu po tyton. Maksymalna miąższość utworów jury górnej stwierdzona w omawianym obszarze wynosi 1060 m, w otworze ND-3. Profil jury górnej w analizowanym rejonie rozpoczyna stosunkowo jednolity litologicznie kompleks mikrytowych osadów wapienno-marglistych, dosyć dobrze udokumentowanych mikrofaunistycznie, określane jako seria gąbkowo-globuligerinowa (Gutowski et al., 2007). Wyżej w profilu występuje silnie zróżnicowana facjalnie i litologicznie seria osadów wapiennych, dolomitycznych i marglistych o znacznej miąższości. Wyróżnić tutaj można co najmniej trzy podstawowe ogniwa: biohermowe, detrytycznych wapieni gąbkowych oraz marglisto-wapienne. Charakterystycznym elementem wyróżniającym się w budowie geologicznej rejonu są budowle organiczne o charakterze mikrobialno-gąbkowym, których kompleksy

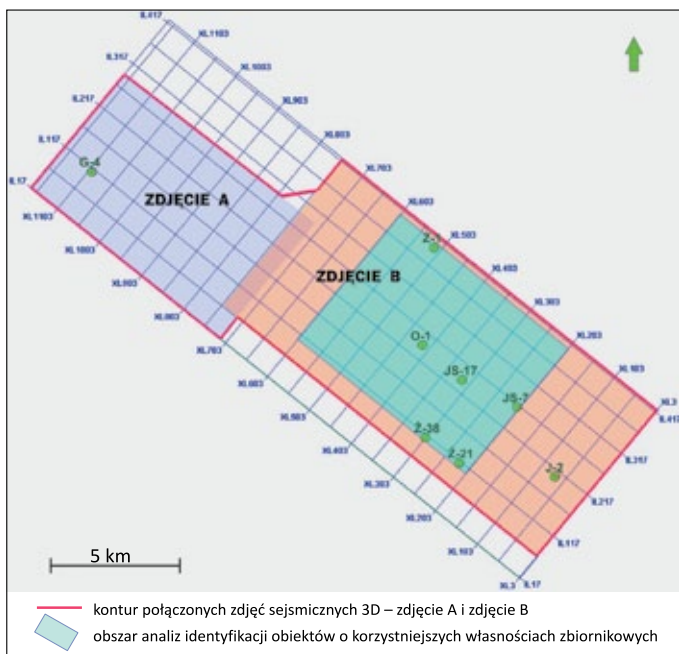


**Rysunek 1.** Lokalizacja obszaru badań na tle głównych jednostek tektonicznych Polski pod pokrywą permsko-mezozoiczną i kenozoiczną (według Żelaźniewicza et al., 2011, częściowo zmienione)

**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, partially changed)

niekiedy mogą osiągać dość znaczne rozmiary (przekraczające nawet 500 m miąższości). Zostały one wydzielone jako seria wielkich bioherm gąbkowo-mikrobialnych (Gutowski et al., 2007). Seria detrytycznych wapieni gąbkowych to osady facji basenowych, międzybiohermowych. Pod względem litologicznym dominują tutaj warstwowane jasnobezowe lub beżowoszare wapienie, przelawicane niekiedy szarymi wapieniami marglistymi. Seria marglisto-wapienna reprezentowana jest przez osady margliste lub marglisto-wapienne, na ogół o ciemnych barwach oraz zmiennej miąższości, od kilkudziesięciu do przeszło 500 metrów. Seria koralowcowo-onkolitowa to utwory wapienno-dolomityczne, niekiedy z przelawiczeniami zwięzłych wapieni marglistych. Wyżej w profilu występują utwory zaliczone do serii muszłowcowo-oolitowej dolnej, reprezentowane przez płytkowodne osady węglanowe, w tym charakterystyczne wapienie organodetrytyczne, oolitowe, onkolitowe i warstwy muszłowców. Zgodnie z wynikami badań w obrębie profilu tego właśnie ogniwa znajduje się granica jura-kreda (patrz Gutowski et al., 2007; Matyja i Barski, 2007; Matyja, 2009; Urbaniec et al., 2010; Świetlik et al., 2011).

Profil **kredy dolnej** rozpoczynają utwory serii marglisto-muszłowcowej, cechujące się dość dużą zmiennością lateralną, reprezentowane przez wapienie intraklastyczno-bioklastyczne o wysokim stopniu przeobrażeń diagenetycznych. Utwory te kończą profil utworów kredy dolnej w rejonie badań. **Kreda górna**, łącznie z albem górnym i paleocenem dolnym, reprezentuje jeden wielki cykl rozwojowy zbiornika sedymentacyjnego (Krassowska, 1997). Miąższość utworów klastycznych cenomanu w rejonie badań wynosi od kilku do kilkunastu metrów. Kompleks turonu i senonu obejmuje utwory reprezentowane głównie przez monotonną serię osadów węglanowych, takich jak: margle, wapienie margliste i gezy, a także opoki margliste i mulaste. Lokalnie wśród utworów węglanowych występują wkładki piaskowców (Baran i Jawor, 1988; Urbaniec et al., 2021), a często również zlepieńców z otoczkami skał węglanowych. Utwory kredy górnej wykazują znaczne zróżnicowanie miąższościowe, wynikające w dużej mierze z oddziaływania procesów polaramijskiej erozji, i na części obszaru zostały one całkowicie usunięte. Największa miąższość utworów turonu i senonu w obszarze badań wynosi około 450 m (Urbaniec et al., 2021).

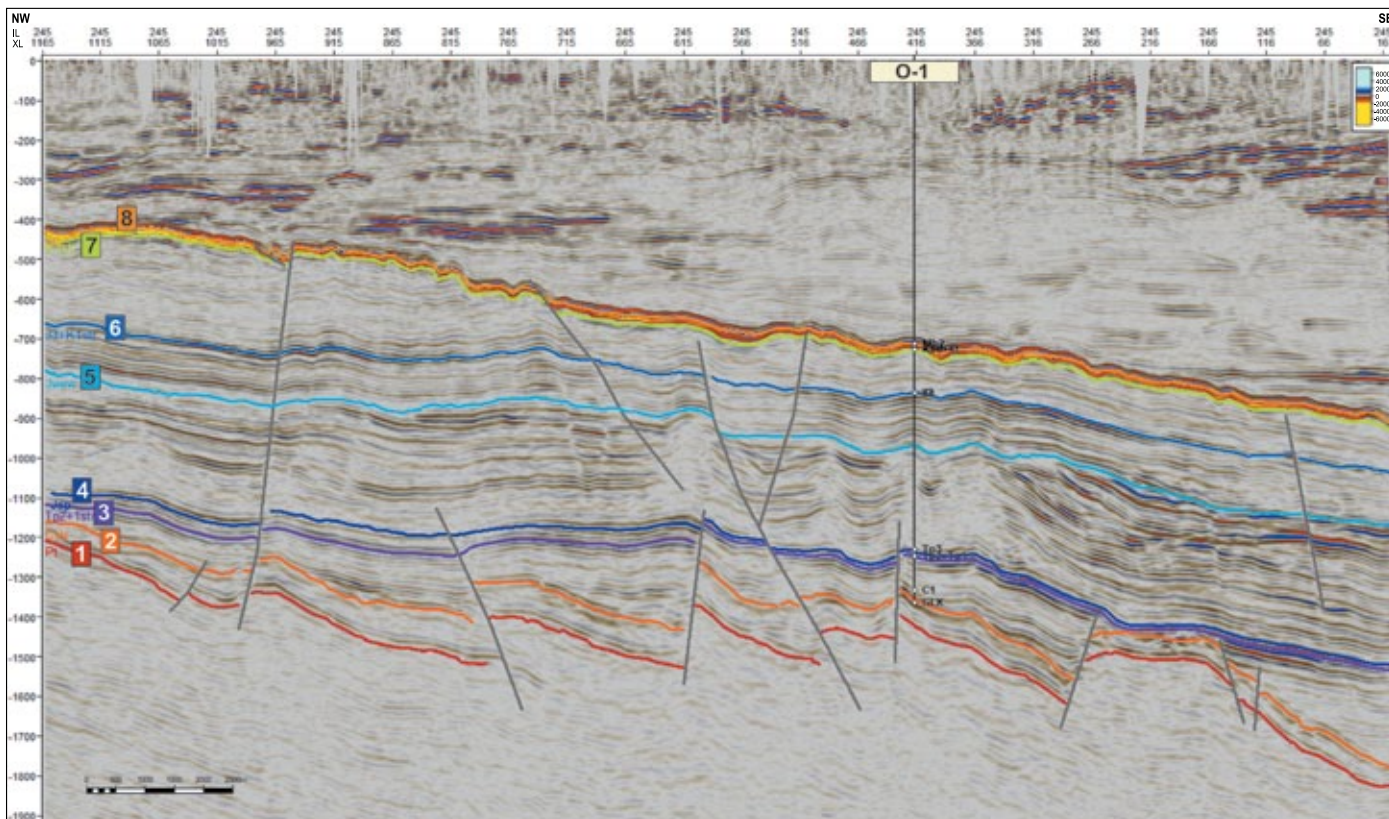


**Rysunek 2.** Kontury analizowanego zdjęcia sejsmicznego 3D oraz obszaru analiz wraz z lokalizacją wybranych otworów wiertniczych

**Figure 2.** Outlines of the analyzed 3D seismic surveys with location of the study area and selected wells

Kompleks **miocenu autochtonicznego** w analizowanym rejonie rozpoczynają utwory serii podewaporatowej badenu, reprezentowane głównie przez pakiet skał ilastych i mułowców należących do formacji skawińskiej, o miąższości rzędu od kilkunastu do kilkudziesięciu metrów. Serię ewaporatów badenu w obszarze analizowanego zdjęcia sejsmicznego budują utwory siarczanowe, tj. gipsy i anhydryty, wydzielane jako formacja z Krzyżanowic (Alexandrowicz et al., 1982; Olszewska, 1999). Zasadniczą część profilu miocenu autochtonicznego w analizowanej strefie zapadliska przedkarpackiego stanowią utwory silikoklastyczne, zaliczane do formacji z Machowa (Alexandrowicz et al., 1982). Formacja ta charakteryzuje się znaczną niejednorodnością litologiczną, a zaliczane do niej utwory to seria osadów ilowcowo-mułwcowo-piaszczystych, występujących w profilu w różnych proporcjach i cechujących się dość dużym zróżnicowaniem facjalnym. Miąższość utworów miocenu w analizowanej strefie jest bardzo zróżnicowana, co uwarunkowane jest zarówno konfiguracją podłoża mezozoicznego, jak i stopniem ich zdarcia przez nasuwające się masy fliszowe Karpat.

Najmłodszym ogniwem stratygraficznym są utwory **czwartorzędu**, głównie zwietrzelinowe, terasy rzeczne oraz



**Rysunek 3.** Czasowy przekrój sejsmiczny IL 245 w wersji PreSTM wraz z interpretacją sejsmiczną (według Nawieśniak, 2016): 1 – strop neoproterozoiku, 2 – strop karbonu, 3 – strop pstrego piaskowca dolnego i środkowego, 4 – spąg jury, 5 – granica wewnątrzjursajska, 6 – strop górnej jury i dolnej kredy, 7 – strop kredy górnej, 8 – strop serii ewaporatowej badenu

**Figure 3.** Seismic section IL 245 in time domain with interpretation (according to Nawieśniak, 2016): 1 – the top of Neoproterozoic, 2 – the top of Carboniferous, 3 – the top of Lower and Middle Buntsandstein, 4 – the bottom of Jurassic, 5 – the intra-Jurassic horizon, 6 – the top of Upper Jurassic – Lower Cretaceous complex, 7 – the top of Upper Cretaceous, 8 – the top of Badenian evaporite series

pozostałości polodowcowe, tworzące luźną pokrywę o miąższości rzędu kilku do kilkunastu metrów.

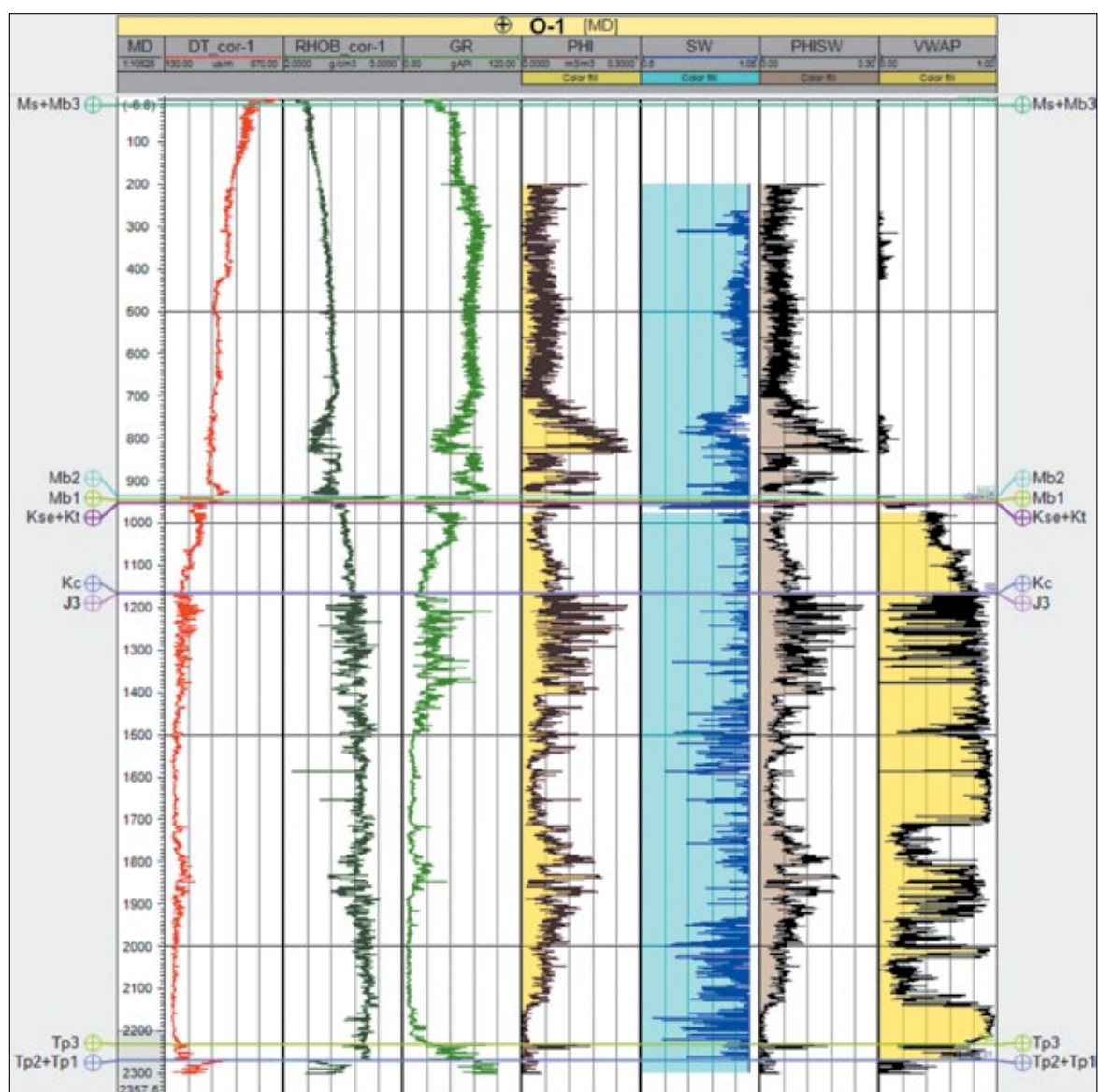
### Dane sejsmiczne i otworowe

Identyfikacja perspektywicznych obiektów geologicznych do składowania CO<sub>2</sub> w formacjach węglanowych jury górnej i kredy dolnej wykonana została na podstawie danych sejsmicznych 3D uzyskanych w wyniku połączenia dwóch zdjęć sejsmicznych (rysunek 2).

Do analizy wybrany został wolumen sejsmiczny w wersji czasowej przed składaniem (PreSTM), gdyż dane te charakteryzują się dobrą dynamiką refleksów sejsmicznych oraz możliwie szczegółowym odwzorowaniem ośrodka geologicznego. W badaniach wykorzystano podstawową wersję interpretacji

strukturalnej, wykonaną w Geofizyce Kraków S.A. (rysunek 3) (Nawieśniak, 2016). Interpretacja ta obejmowała korelację powierzchni uskokowych w obrębie utworów wszystkich pięter strukturalnych oraz korelację ośmiu granic sejsmicznych o zasięgu regionalnym.

W ramach niniejszej pracy do obliczeń wykorzystano interpretację trzech najbardziej istotnych granic sejsmicznych, związanych z utworami jurajskimi (rysunek 3), tj. Jsp (spąg utworów jury), Jwew (granica wewnątrzjurajska związana z powierzchnią niezgodności kątowej występującej w obrębie kompleksu utworów górnej jury) oraz J3+K1 str (strop utworów górnej jury i dolnej kredy). Ponadto do analiz wykorzystano interpretację parametrów złożowych (nasylenie wodą, porowatość) wykonaną w Geofizyce Kraków S.A., która stanowiła ważny element w korelacji parametrów petrofizycznych i geofizycznych z danymi sejsmicznymi (rysunek 4).



**Rysunek 4.** Zestawienie wybranych profilowań geofizycznych z wynikami interpretacji parametrów petrofizycznych – otwór O-1

**Figure 4.** Compilation of selected well log data with interpretation of reservoir parameters (O-1 well)

Otwór O-1 jest najnowszym odwierciem zrealizowanym w obszarze badań (odwierconym w roku 2015), posiadającym komplet pomiarów geofizycznych. W otworze tym wykonano dwa opróbowania w utworach jury górnej, z których uzyskano przyływy wody złożowej oraz przyływ słabej ilości gazu ziemnego wraz z ropą naftową i wodą złożową.

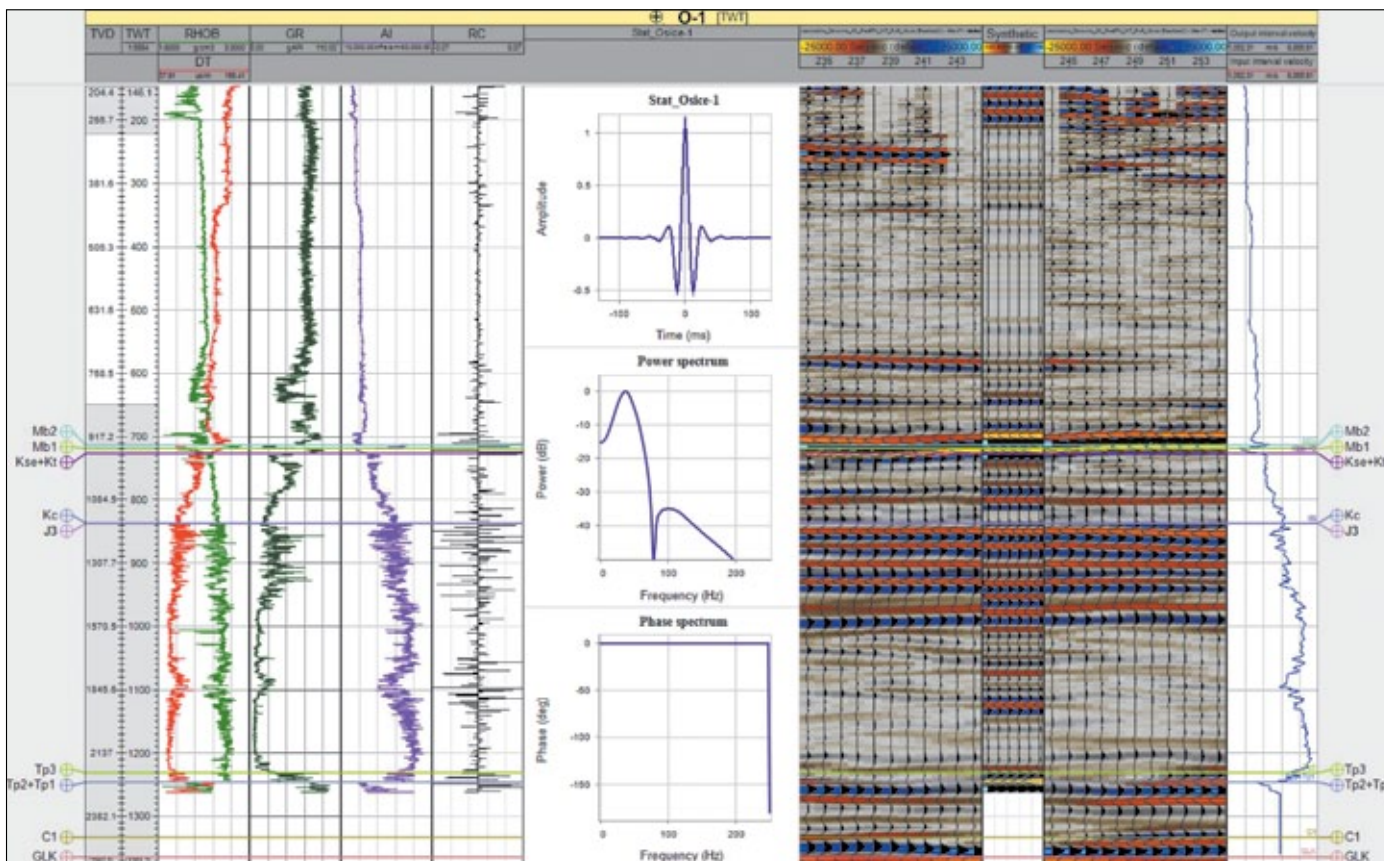
on obliczany. Otrzymane wyniki wskazują na bardzo dobre dowiązanie danych otworowych z danymi sejsmicznymi, co umożliwia poprawne określenie relacji czas-głębokość w pozycji i otoczeniu analizowanego otworu.

### Konstrukcja sejsmogramu syntetycznego

Dowiązanie danych otworowych wraz z interpretacją stratygraficzną do danych sejsmicznych może być realizowane na podstawie pomiarów PPS, trasy sumarycznej (wykresy typu L-plot) lub obliczonych sejsmogramów syntetycznych (Walia et al., 2005; Bartoń, 2010). Na potrzeby niniejszej pracy dowiązanie danych otworowych do sejsmicznych było wykonywane na podstawie konstrukcji sejsmogramu syntetycznego dla analizowanego otworu O-1 (rysunek 5). Na podstawie profilowania akustycznego (DT) i gęstości (RHOB) oraz wyekstrahowanych sygnałów z wolumenu sejsmicznego 3D w otoczeniu otworu O-1 obliczony został sejsmogram syntetyczny. Do ekstrakcji sygnału użyto metody statystycznej, uzyskując sygnał o kształcie zerofazowym i zakresach widm częstotliwościowych odpowiadających trasom, z których był

### Metodyka badań

Wyznaczenie przestrzennego rozkładu parametrów złożowych (np. porowatość, szczelinowatość, nasycenie) z danych sejsmicznych realizowane jest przede wszystkim na podstawie inwersji sejsmicznej. Zadaniem inwersji jest odwzorowanie fizycznej struktury i właściwości ośrodka skalnego na podstawie pomiarów sejsmicznych. Jest ona cennym narzędziem geofizycznym umożliwiającym estymację parametrów fizycznych ośrodka geologicznego z danych sejsmicznych w postaci zmian impedancji, będących iloczynem gęstości i prędkości propagacji. Umożliwia ona przekształcenie amplitudy refleksów sejsmicznych w fizyczne parametry skał, a w konsekwencji w 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 najbardziej wiarygodnie charakteryzuje właściwości fizyczne ośrodka



Rysunek 5. Sejsmogram syntetyczny obliczony dla otworu O-1

Figure 5. Synthetic seismogram calculated for O-1 well

geologicznego (Veeken et al., 2004; Jędrzejowska-Tyczkowska i Bartoń, 2005).

W ramach tematu sejsmicznego w Geofizyce Kraków S.A. wykonana została inwersja symultaniczna (Nawieśniak, 2016), której wyniki w postaci atrybutów: impedancji fali podłużnej ( $Z_p$ ), iloczynu stałej Lamégo i gęstości ośrodka (Lambda-Rho –  $\lambda\rho$ ) oraz iloczynu modułu sprężystości poprzecznej i gęstości ośrodka (Mu-Rho –  $\mu\rho$ ) zostały użyte do określenia zależności pomiędzy parametrami sprężystymi a złożowymi (rysunki 6–8). 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 Igbinigie, 2020; Kaczmarczyk-Kuszpit, 2021).

### Impedancja fali podłużnej ( $Z_p$ )

Impedancja fali podłużnej ( $Z_p$ ) jest iloczynem gęstości ośrodka ( $\rho$ ) i prędkości fal podłużnych ( $V_p$ ). Wartość impedancji fali podłużnej (twardość akustyczna) zależy od porowatości, litologii oraz nasycenia badanej skały. Każdy z wymienionych czynników może mieć istotne znaczenie dla wynikowej wartości impedancji. Wzrost porowatości i nawet minimalne nasycenie gazem powoduje znaczne obniżenie impedancji  $Z_p$ . Wpływ czynnika litologicznego na wartość impedancji jest zmienny i zwykle utrudnia lub zupełnie uniemożliwia poprawne

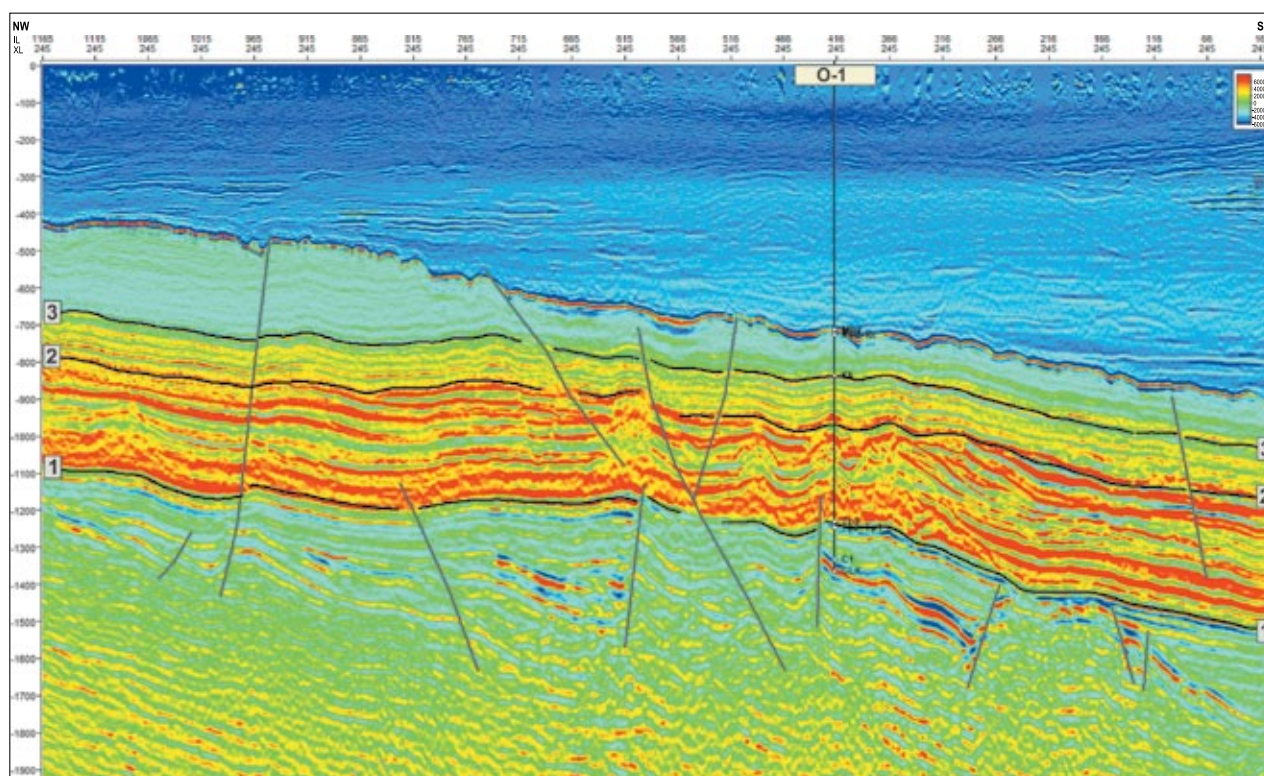
oszacowanie porowatości lub nasycenia skały. Zmiany fałdalne w analizowanych utworach węglanowych powiązane są głównie z mechanizmami i środowiskiem sedimentacji tych utworów, a w mniejszym stopniu ze zmianami składu mineralnego (rysunek 6).

### Parametr Lambda-Rho ( $\lambda\rho$ )

Parametr Lambda-Rho jest wyrażony iloczynem stałej Lamégo ( $\lambda$ ) i gęstości ośrodka ( $\rho$ ) (Inichinbia et al., 2014; Adekunle i Chukwuemeka, 2018). Parametr ten dobrze odzwierciedla zmiany w nasyceniu przestrzeni porowej skały. Jest on czuły na rodzaj medium wypełniającego przestrzeń porową. Wzrost zawartości gazu powoduje obniżenie wartości Lambda-Rho. Rozkład tego atrybutu na przykładowym przekroju sejsmicznym przedstawiono na rysunku 7.

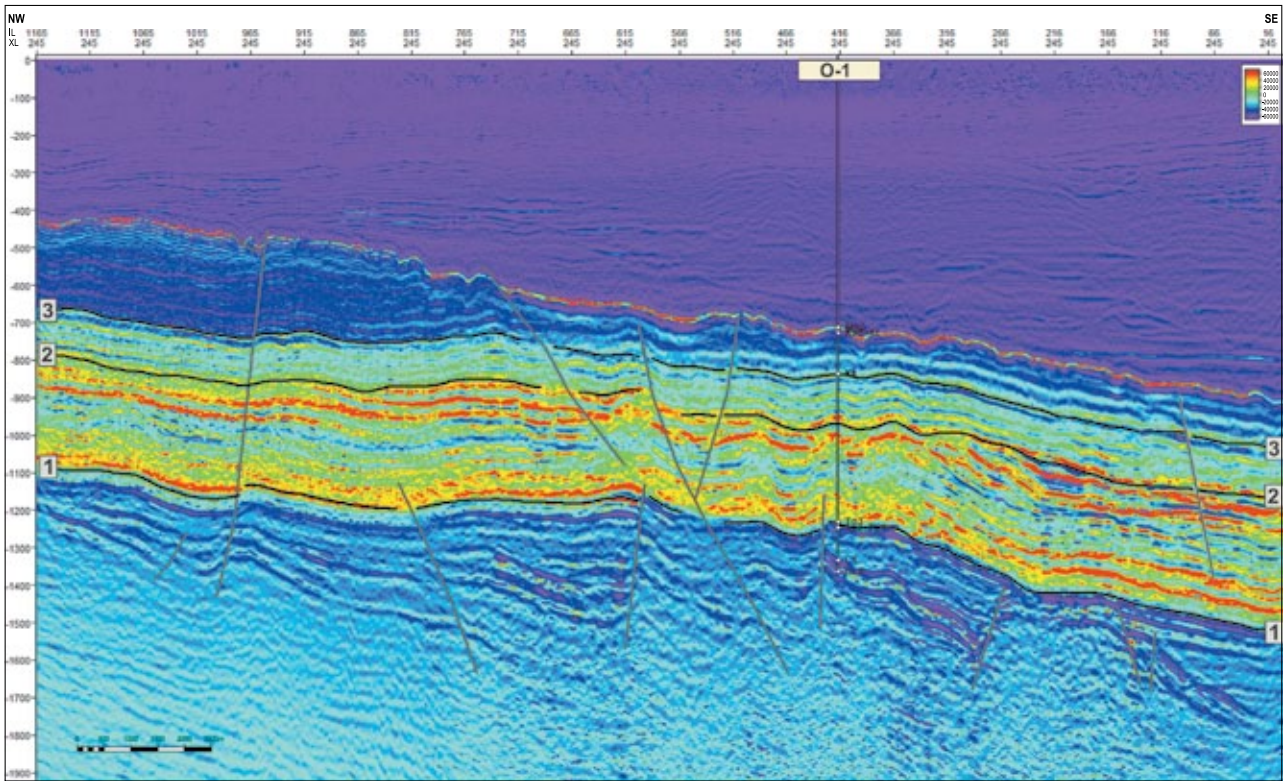
### Parametr Mu-Rho ( $\mu\rho$ )

Parametr Mu-Rho jest wyrażony iloczynem modułu sprężystości poprzecznej ( $\mu$ ) i gęstości ośrodka ( $\rho$ ) (Inichinbia et al., 2014). Parametr ten jest związany z fałą poprzeczną S i opisuje twardość szkieletu skalnego. Na jego wartość nie ma wpływu rodzaj płynów zawartych w przestrzeniach porowych (Ogbamikhumi i Igbinigie, 2020). Rozkład tego atrybutu na przykładowym przekroju sejsmicznym przedstawiono na rysunku 8.



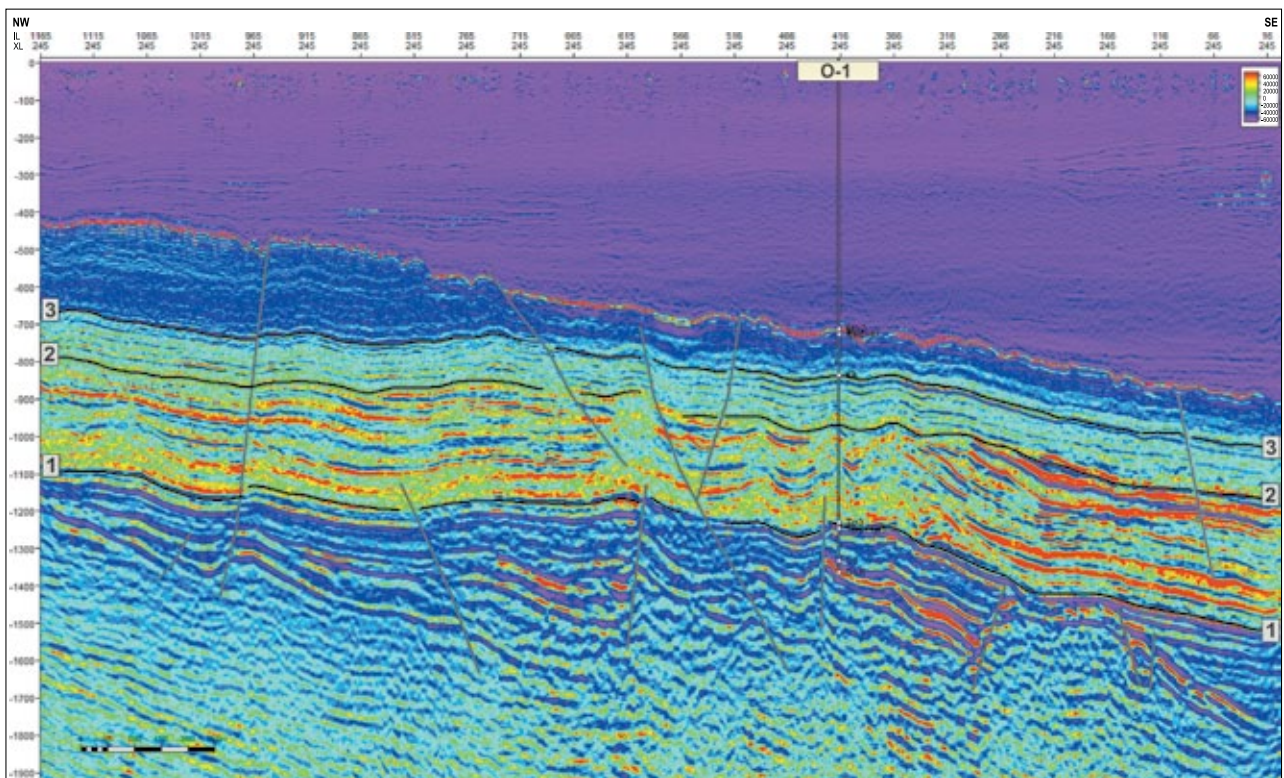
**Rysunek 6.** Przekrój impedancji fali podłużnej IL 245 w wersji czasowej wraz z interpretacją sejsmiczną wybranych horyzontów (według Nawieśniak, 2016): 1 – spąg jury, 2 – granica wewnątrzjurajska, 3 – strop górnej jury i dolnej kredy

**Figure 6.** Time section IL 245 of the P wave acoustic impedance with interpretation of selected horizons (according to Nawieśniak, 2016): 1 – the bottom of Jurassic, 2 – the intra-Jurassic horizon 3 – the top of Upper Jurassic – Lower Cretaceous complex



**Rysunek 7.** Przekrój sejsmiczny IL 245 w wersji czasowej przedstawiający rozkład atrybutu Lambda-Rho wraz z interpretacją sejsmiczną wybranych horyzontów (według Nawieśniak, 2016); pozostałe objaśnienia jak pod rysunkiem 6

**Figure 7.** Time section IL 245 of the Lambda-Rho attribute with interpretation of selected horizons (according to Nawieśniak, 2016); explanation as in Figure 6



**Rysunek 8.** Przekrój sejsmiczny IL 245 w wersji czasowej przedstawiający rozkład atrybutu Mu-Rho wraz z interpretacją sejsmiczną wybranych horyzontów (według Nawieśniak, 2016); pozostałe objaśnienia jak pod rysunkiem 6

**Figure 8.** Time section IL 245 of the Mu-Rho attribute with interpretation of selected horizons (according to Nawieśniak, 2016); explanation as in Figure 6



Parametry sprężyste rejestrowane są w ośrodku geologicznym w postaci propagacji fal podłużnych  $V_p$  (fale kompresyjne) oraz fal poprzecznych  $V_s$  (fale ścinające). Fale podłużne rozchodzą się w matrycy skalnej, cieczech i gazach. Podczas ich propagacji zmianom ciśnienia towarzyszą lokalne odkształcenia objętości. Natomiast fale poprzeczne powodują odkształcenia postaci i z tego powodu nie rozchodzą się w płynach.

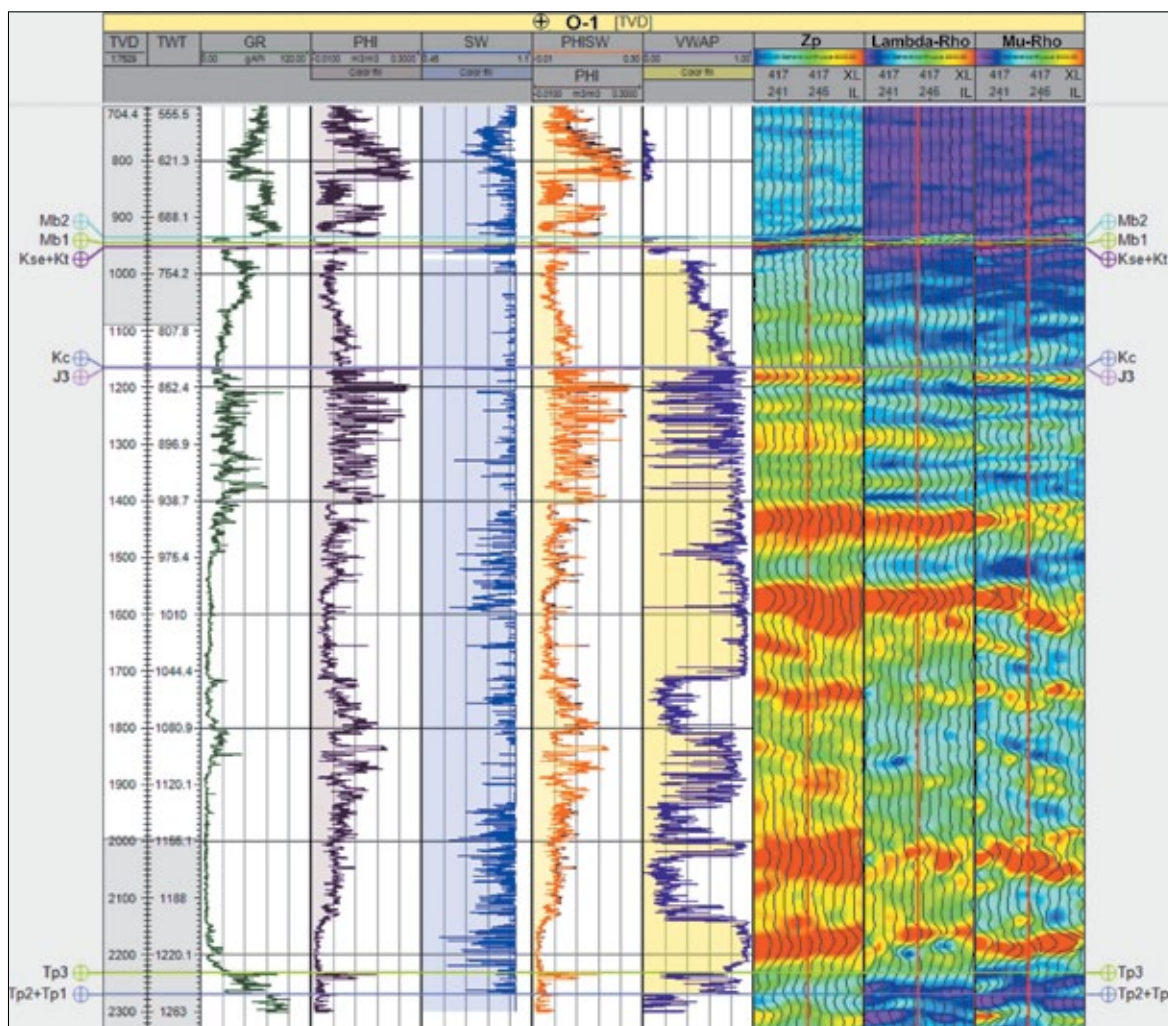
Z kolei parametry elastyczne stanowią kombinację parametrów  $V_p$ ,  $V_s$  oraz gęstości i są przedstawiane w postaci współczynnika Poissona, modułu odkształcenia objętościowego, modułu odkształcenia postaci, stałej Lamégo oraz modułu Younga. Są one wykorzystywane w identyfikacji parametrów złożowych, typów litologicznych oraz interpretacji geologiczno-złożowej (Leginowicz, 2016; Adekunle i Chukwuemeka, 2018).

Wyodrębnienie obiektów przestrzennych do potencjalnej sekwestracji  $\text{CO}_2$  na podstawie interpretacji danych sejsmicznych 3D, przy uwzględnieniu danych geofizyki otworowej i badań petrofizycznych, wykonano dla obszaru zlokalizowanego wokół otworu O-1 (rysunek 2). Wykorzystane do obliczeń dane

sejsmiczne, w postaci opisanych wyżej atrybutów, pochodziły z inwersji symultanicznej. Wybór stref o potencjalnie dobrych właściwościach zbiornikowych oparty był na powszechnie znanych zależnościach fizycznych (Inichinbia et al., 2014; Ezeh, 2015; Adekunle i Chukwuemeka, 2018; Munyithya et al., 2019; Ogbamikhumi i Igbinigie, 2020; Kaczmarczyk-Kuszpit, 2021):

- 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.

W kolejnym etapie 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 najlepiej pozwalały wykazać zależności pomiędzy parametrami sprężystymi a elastycznymi (rysunek 9).



**Rysunek 9.** Zestawienie wyników interpretacji petrofizycznej oraz atrybutów  $Z_p$ , Lambda-Rho i Mu-Rho dla otworu O-1

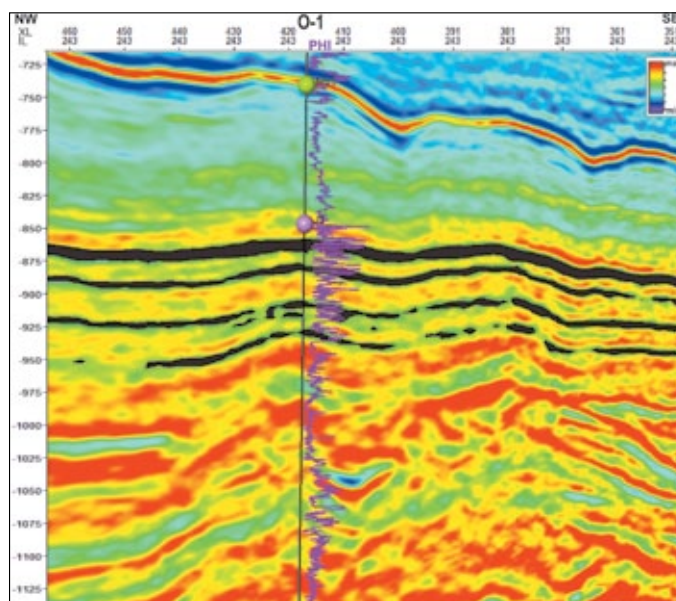
**Figure 9.** Compilation of petrophysical interpretation and  $Z_p$ , Lambda-Rho and Mu-Rho attributes for the O-1 well

W badaniach wykorzystano moduł *Geobody Interpretation* zawarty w oprogramowaniu Petrel, który umożliwia wyodrębnienie z danych sejsmicznych 3D przestrzennych obiektów (ang. *geobody probes*) o zadanych parametrach. Używa on najnowocześniejszej technologii do identyfikacji i wyodrębnienia widocznych obiektów z danych sejsmicznych. Do analizy wykorzystano opcję *horizon probe*, biorąc pod uwagę bramkę czasową obejmującą interwał od stropu wyinterpretowanego horyzontu J3+K1str do wartości czasu 120 ms poniżej tego horyzontu.

### Wyniki badań

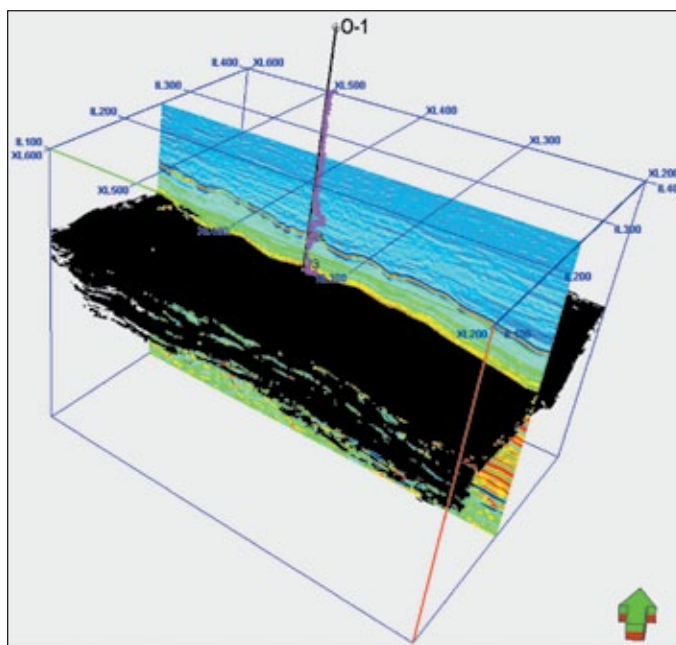
W obszarze zlokalizowanym wokół otworu O-1 identyfikację obiektów o korzystniejszych własnościach złożowych wykonano na podstawie zadanych wartości odcięcia na wykresie krzyżowym impedancji fali podłużnej i Lambda-Rho (rysunek 10), śledząc selekcjonowane wartości z wybranego obszaru. Wynik tej selekcji przedstawiono na tle sekcji sejsmicznej IL 243 w wersji impedancji fali podłużnej z naniesioną krzywą porowatości (PHI) dla otworu O-1 (rysunki 11 i 12).

Kolejnym wariantem wykonanych obliczeń było wyodrębnienie obiektów o lepszych parametrach zbiornikowych na podstawie zadanych wartości odcięcia na wykresie krzyżowym atrybutów Lambda-Rho i Mu-Rho (rysunek 13). Wyniki wydzielenia tych stref przedstawiono na tle sekcji sejsmicznej parametru Lambda-Rho (rysunki 14–15).



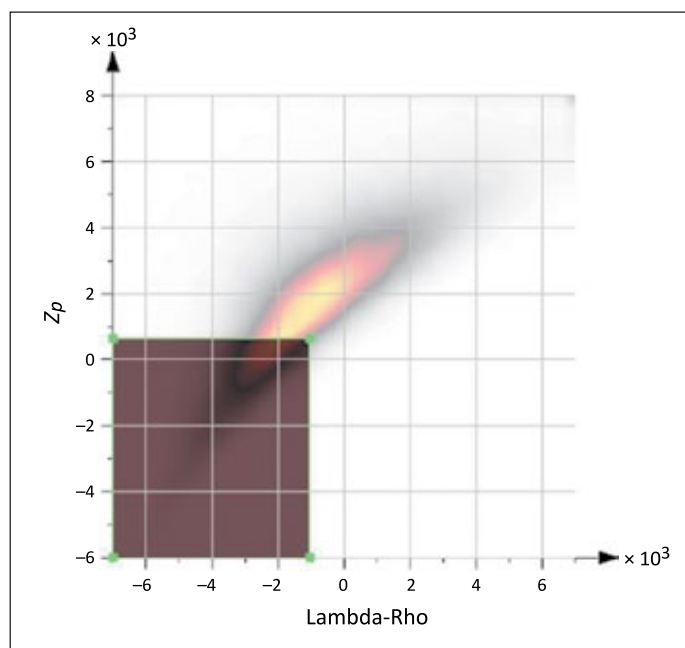
**Rysunek 11.** Przekrój sejsmiczny IL 243 impedancji fali podłużnej ( $Z_p$ ) z dopasowaniem krzywej porowatości PHI w pozycji otworu O-1. Wyodrębnienie stref geologicznych o korzystniejszych parametrach złożowych zaznaczono kolorem czarnym

**Figure 11.** Time section IL 243 of the P-wave acoustic impedance ( $Z_p$ ) and the PHI porosity curve setting at the O-1 well position. Identification of geological zones with better reservoir parameters is marked in black



**Rysunek 12.** Przestrzenny widok wydzielonych stref o korzystniejszych parametrach złożowych na tle przekroju IL 243 impedancji fali podłużnej ( $Z_p$ )

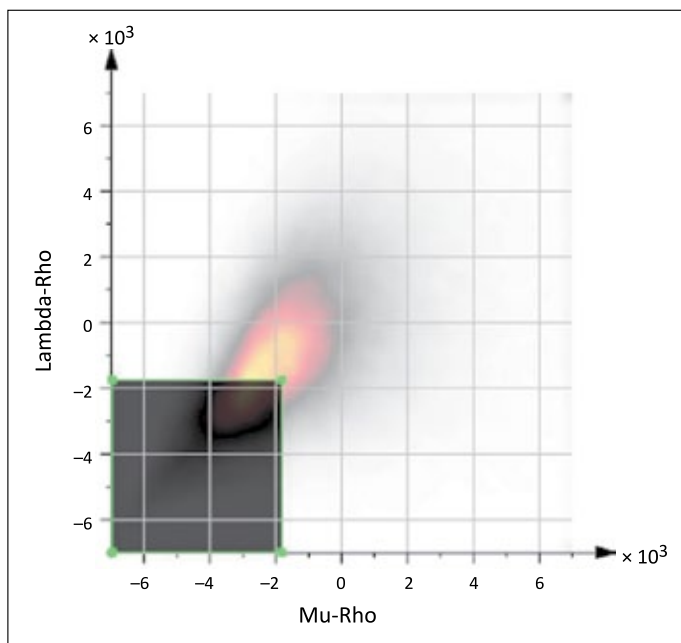
**Figure 12.** 3D view of zones with better reservoir properties against the time section IL 243 of the P-wave impedance ( $Z_p$ )



**Rysunek 10.** Wykres krzyżowy impedancji fali podłużnej ( $Z_p$ ) i atrybutu Lambda-Rho wyrażonych w wartościach względnych

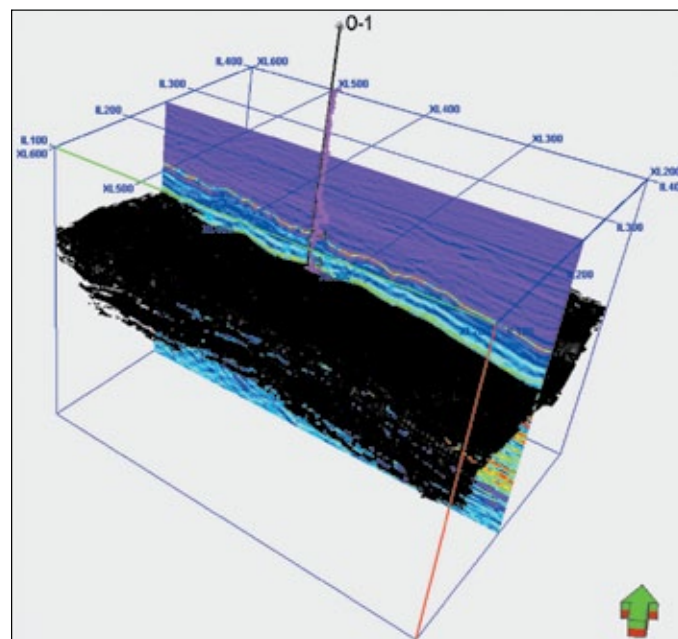
**Figure 10.** Cross plot of the P-wave accoustic impedance ( $Z_p$ ) versus the Lambda-Rho attribute expressed in relative values

W ostatnim wariantcie obliczeń na podstawie wykresu krzyżowego atrybutów Lambda-Rho i Mu-Rho wyróżnione w poprzednim etapie strefy o lepszych parametrach złożowych



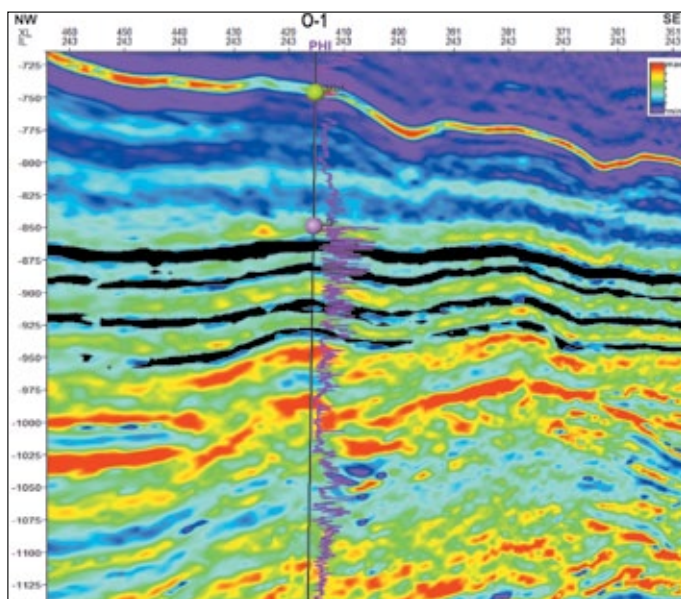
**Rysunek 13.** Wykres krzyżowy atrybutów sejsmicznych Lambda-Rho i Mu-Rho, wyrażony w wartościach względnych

**Figure 13.** Cross plot of Lambda-Rho and Mu-Rho seismic attributes, expressed in relative values



**Rysunek 15.** Przestrzenny widok wydzielonych stref o lepszych własnościach złożowych na tle przekroju IL 243 atrybutu Lambda-Rho

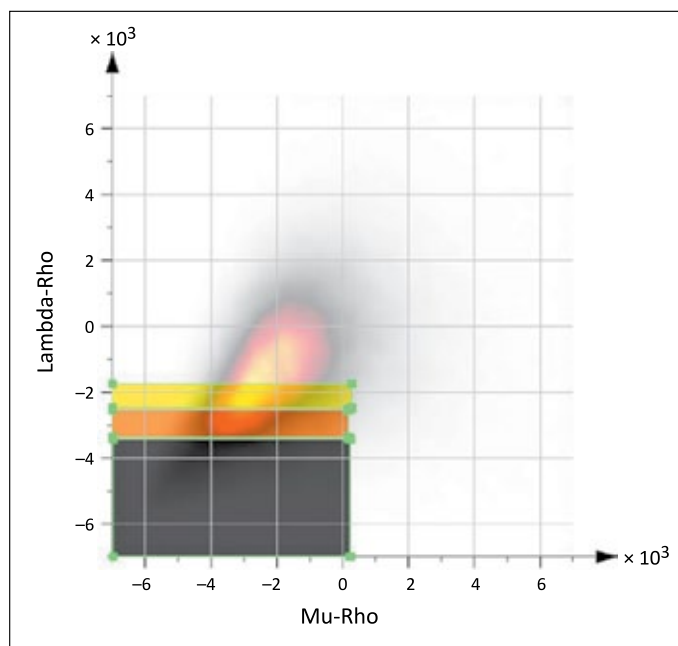
**Figure 15.** 3D view of zones with better reservoir properties against the time section IL 243 of the Lambda-Rho attribute



**Rysunek 14.** Przekrój IL 243 atrybutu Lambda-Rho z dopasowaniem krzywej porowatości PHI w pozycji otworu O-1. Wyodrębnienie stref o korzystniejszych parametrach złożowych zaznaczono kolorem czarnym

**Figure 14.** Time section IL 243 of the Lambda-Rho attribute with the PHI porosity curve setting at O-1 well position. Zones with better reservoir parameters are highlighted in black

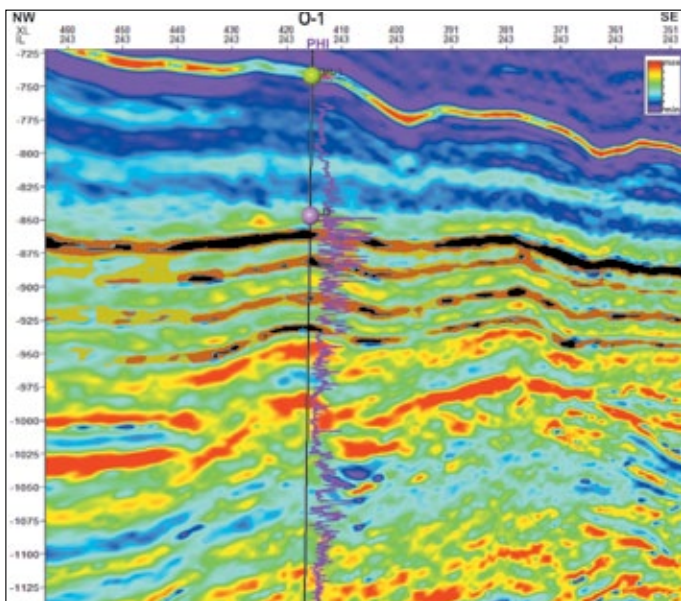
(przy czym dla atrybutu Mu-Rho zmieniono częściowo wartość odcięcia) podzielone zostały na trzy klasy o zróżnicowanych zakresach wartości analizowanych atrybutów (rysunki 16–18). Analizując wykres krzyżowy atrybutów Lambda-Rho i Mu-Rho (rysunek 16), starano się dobrać wartości odcięć w taki



**Rysunek 16.** Wykres krzyżowy atrybutów sejsmicznych Lambda-Rho i Mu-Rho z wyodrębnieniem trzech klas wartości, wyrażony w wartościach względnych

**Figure 16.** Cross plot of Lambda-Rho and Mu-Rho seismic attributes with distribution of three value classes, expressed in relative values

sposób, aby wydzielane klasy odpowiadały generalnie określonym zakresom porowatości na krzywej PHI (rysunek 17). Wyselekcjonowane zakresy wartości, odpowiadające trzem klasom wyróżnionym przy użyciu opcji *horizon probe*, zostały



**Rysunek 17.** Przekrój IL 243 atrybutu Lambda-Rho z dopasowaniem krzywej porowatości PHI w pozycji otworu O-1. Wyodrębnienie stref o korzystniejszych parametrach złożowych z podziałem na trzy klasy: klasa 1 (kolor czarny), klasa 2 (kolor brązowy), klasa 3 (kolor oliwkowy)

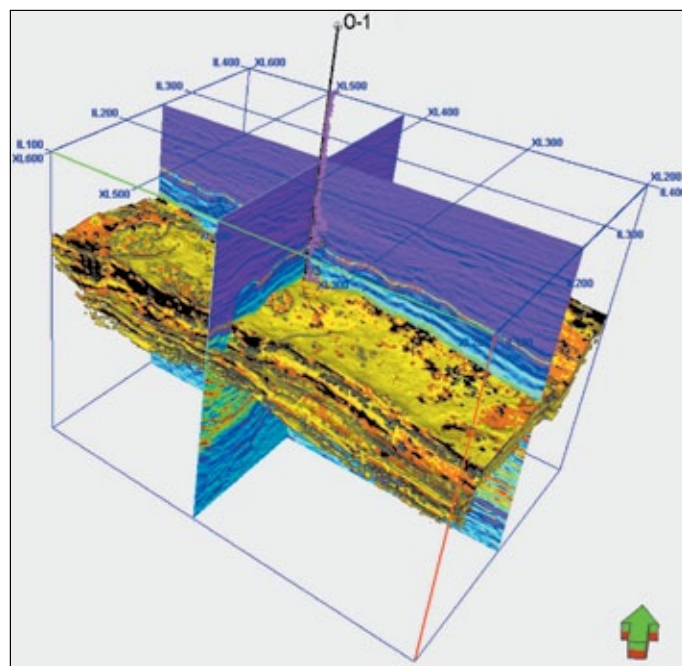
**Figure 17.** Time section IL 243 of the Lambda-Rho attribute with PHI porosity curve setting at O-1 well position. Identification of zones with better reservoir parameters separated into three classes: Class 1 (black color), Class 2 (brown color), Class 3 (olive color)

wyeksportowane do postaci *geobody*, czyli obiektów przestrzennych, na których wykonywać można modelowania własności petrofizycznych (rysunek 19).

Na rysunku 20 obok zestawienia wyników interpretacji petrofizycznej w otworze O-1 przedstawiono również wynikowe przekroje geobody dla wariantów  $Z_p$  i Lambda-Rho oraz Lambda-Rho i Mu-Rho. Uzyskane rezultaty wskazują, że wydzielone na podstawie korelacji parametrów Lambda-Rho i Mu-Rho obiekty geobody lepiej korelują się z profilowaniem porowatości PHI niż w przypadku korelacji  $Z_p$  i Lambda-Rho.

Przedstawione wyniki rozpoznawania stref o polepszonych własnościach złożowych, uzyskane na podstawie wykresów krzyżowych atrybutów sejsmicznych obliczonych z inwersji symultanicznej, finalnie zostały zobrazowane przestrzennie i wyekstrahowane do obiektów trójwymiarowych (ang. *geobody*). Wspomniane publikacje o podobnej tematyce dotyczyły przede wszystkim badań ukierunkowanych na identyfikację typów litologicznych i stref o polepszonych własnościach złożowych w profilach otworów wiertniczych (Munyithya et al., 2019; Ogbamikhumi i Igbinigie, 2020; Kaczmarczyk-Kuszpit, 2021).

Zaprezentowane w niniejszym artykule rezultaty badań stanowią kolejny krok w stosunku do cytowanych publikacji, rozpatrując zagadnienie możliwości przestrzennej estymacji i ekstrapolacji stref o polepszonych własnościach parametrów złożowych.



**Rysunek 18.** Przestrzenny widok wydzielonych trzech klas (*horizon probe*) w obrębie stref o lepszych własnościach złożowych na tle przekrojów IL 243 i XL 417 atrybutu Lambda-Rho

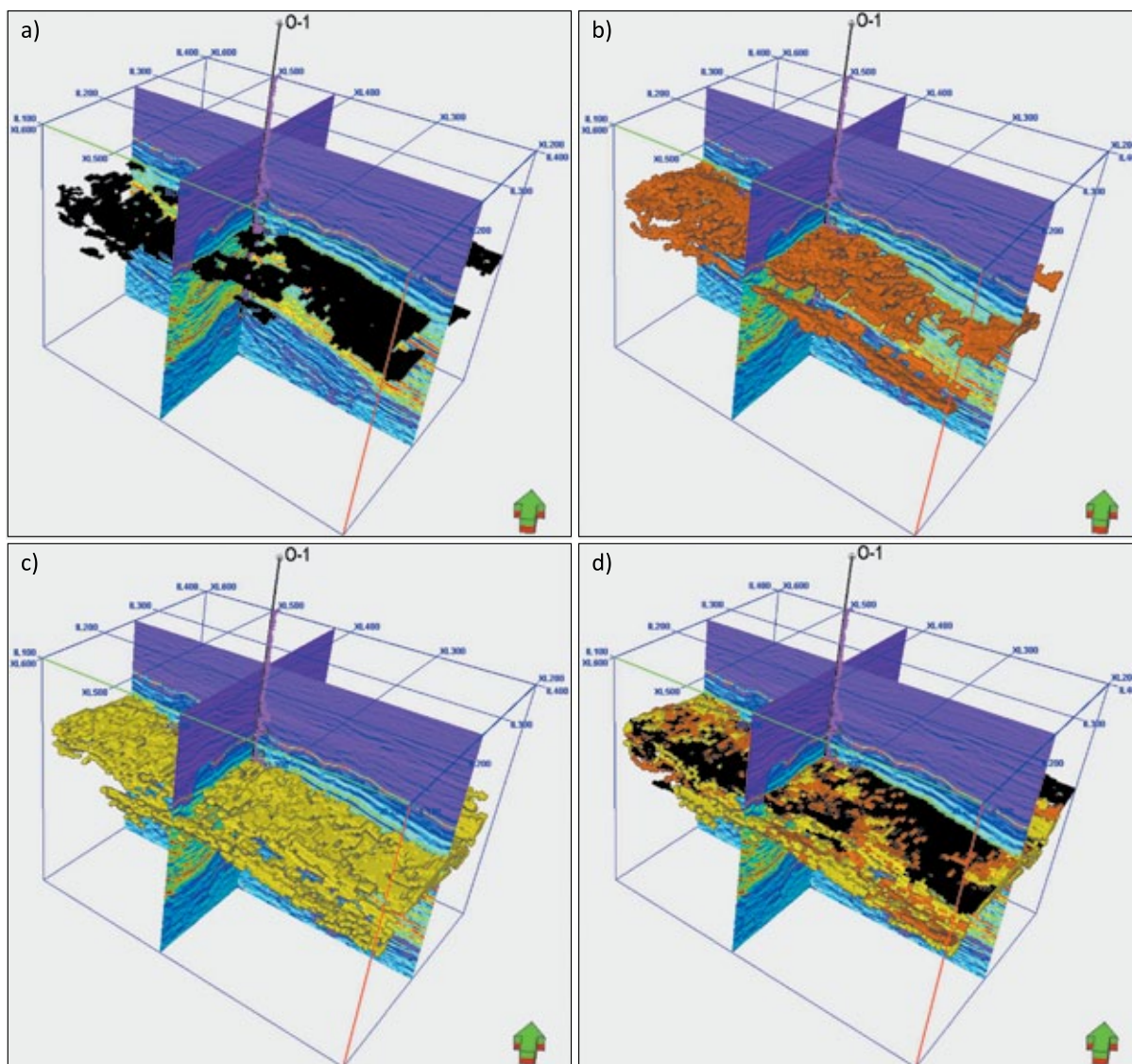
**Figure 18.** 3D view of the separated three classes (*horizon probe*) within the zones with better reservoir properties against the background of IL 243 and XL 417 sections of the Lambda-Rho attribute

### Podsumowanie i wnioski

W artykule, na przykładzie utworów węglanowych jury górnej i kredy dolnej z obszaru przedgórze Karpat, przedstawiono metodykę, która na podstawie danych sejsmicznych i otworowych może posłużyć do wyodrębnienia stref/obiektów o korzystnych własnościach petrofizycznych. Prezentowane badania przeprowadzono na zdjęciu sejsmicznym 3D, które pierwotnie zaprojektowane zostało w celu rozpoznania perspektyw poszukiwawczych dla złóż ropy naftowej i gazu ziemnego w tym rejonie.

Dobra jakość zapisu sejsmicznego, charakteryzująca się wysoką rozdzielczością i dużą ciągłością refleksów sejsmicznych, pozwoliła na przeprowadzenie szczegółowych analiz, opartych na wynikach inwersji sejsmicznej.

W celu identyfikacji obiektów o korzystniejszych własnościach złożowych przeprowadzono trzy warianty obliczeń, opartych na atrybutach pochodzących z inwersji symultanicznej. W pierwszej wersji obliczeń wyodrębniono strefy o lepszych własnościach złożowych na podstawie zadanych wartości odcień na wykresie krzyżowym impedancji fali podłużnej i Lambda-Rho ( $Z_p - \lambda\rho$ ). W drugiej wersji obiekty wyodrębnione zostały poprzez zdefiniowanie wartości odcień na wykresie krzyżowym atrybutów Lambda-Rho i Mu-Rho ( $\lambda\rho - \mu\rho$ ), natomiast w trzeciej wersji wykorzystano tę samą



**Rysunek 19.** Przestrzenny widok geobody dla trzech klas o korzystniejszych własnościach złóżowych na tle przekrojów IL 243 i XL 417 atrybutu Lambda-Rho: a) klasa 1, b) klasa 2, c) klasa 3, d) łącznie dla wszystkich klas

**Figure 19.** 3D view of geobodies for the three classes with better reservoir properties against the IL 243 and the XL 417 Lambda-Rho attribute cross sections; (a) class 1, (b) class 2, (c) class 3, (d) total for all classes

relację atrybutów co w wersji drugiej, ale z tą różnicą, że wydzielone zostały trzy klasy o zróżnicowanych zakresach wartości analizowanych atrybutów, odpowiadające zmienności parametrów złóżowych.

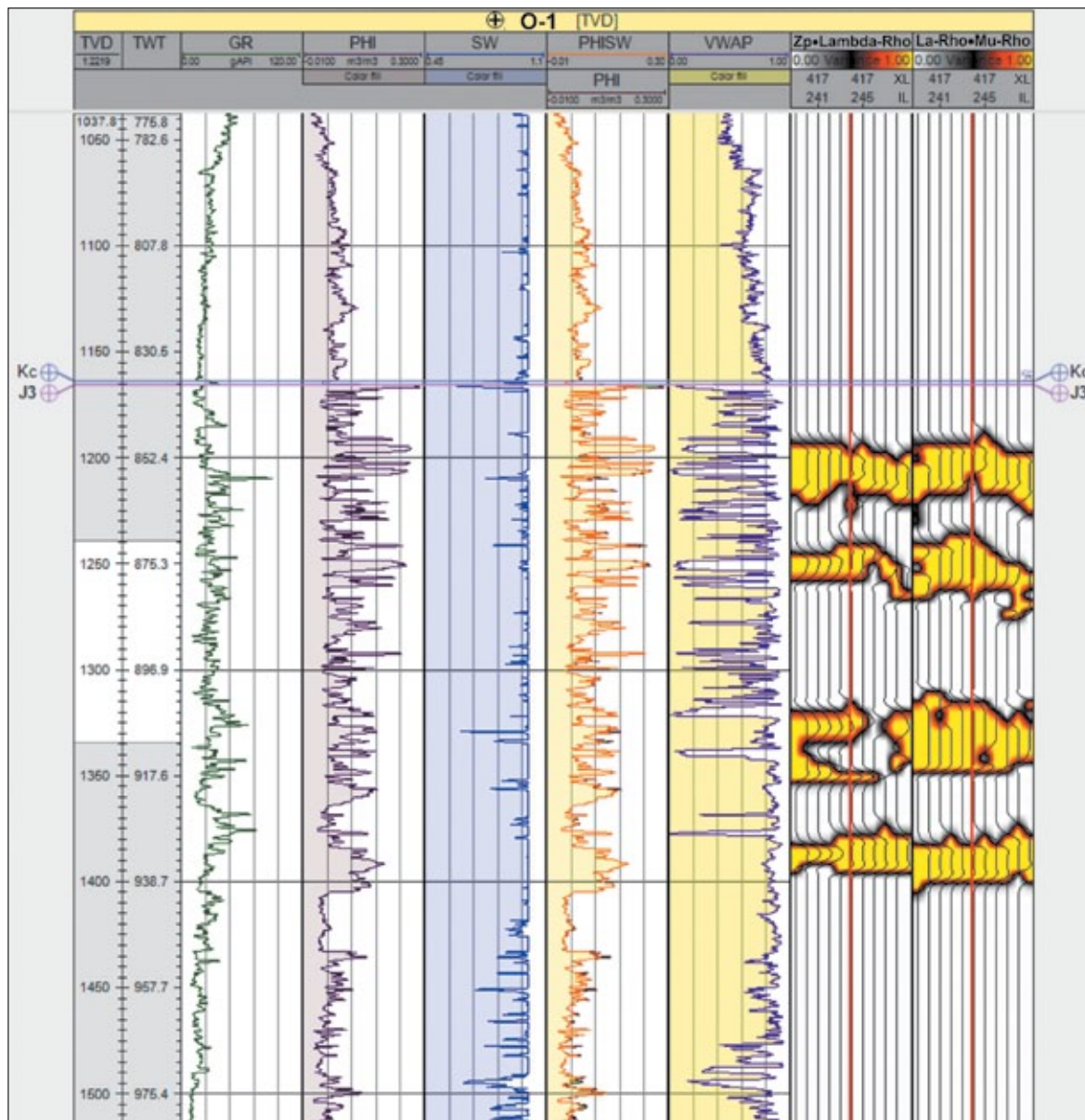
Analizując wszystkie uzyskane wyniki, należy stwierdzić, że trzeci wariant obliczeń przyniósł najlepsze efekty – w postaci dokładniejszego dopasowania uzyskanego obrazu na przekrojach sejsmicznych z profilowaniem porowatości w rozpatrywanym otworze.

Opracowana metodyka może znaleźć w przyszłości zastosowanie zarówno do detekcji stref/poziomów o korzystniejszych parametrach zbiornikowych, które potencjalnie mogą być wykorzystane do składowania CO<sub>2</sub>, jak również do bardziej zaawansowanych procesów budowy modeli statycznych i dynamicznych analizowanych formacji skalnych.

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.
- Alexandrowicz S.W., Garlicki A., Rutkowski J., 1982. Podstawowe jednostki litostratygraficzne miocenu zapadliska przedkarpacciego. *Kwartalnik Geologiczny*, 26(2): 470–471.
- Arora V., Saran R.K., Kumar R., Yadav S., 2019. Separation and sequestration of CO<sub>2</sub> in geological formations. *Materials Science for Energy Technologies*, 2(3): 647–656. DOI: 10.1016/j.mset.2019.08.006.



**Rysunek 20.** Zestawienie wyników interpretacji petrofizycznej z przekrojami geobody dla wariantów  $Z_p$  i Lambda-Rho oraz Lambda-Rho i Mu-Rho

**Figure 20.** Comparison of petrophysical interpretation results with geobody sections for the  $Z_p$  & Lambda-Rho and the Lambda-Rho & Mu-Rho variants

- 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.
- Baran U., Jawor E., 1988. Nowe możliwości poszukiwawcze złóż ropy naftowej i gazu ziemnego w obszarze Jastrząbka–Żukowice–Pilzno. *Nafta*, 44(7–8): 161–166.
- Bartoń R., 2010. Zastosowanie pomiarów PPS 3C do szczegółowego odwzorowania i interpretacji strefy okołotworowej. *Nafta-Gaz*, 66(7): 561–572.
- Buła Z., Żaba J., Habryn R., 2008. Regionalizacja tektoniczna Polski – Polska południowa (blok górnośląski i małopolski). *Przegląd Geologiczny*, 56(10): 912–920.
- Davis T., Landro M., Wilson M. (eds.), 2019. Geophysics and Geosequestration. *Cambridge: Cambridge University Press*. DOI: 10.1017/9781316480724.
- 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.
- 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 Państw. Inst. Geol.*, 426: 1–26.
- Inichinbia S., Sule P., Aminu L. Ahmed A., Hamza H., Omudu L., 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, south-eastern Poland. *Geological Quarterly*, 55(2): 85–94.

- 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.
- Krassowska A., 1997. Kreda górna (alb górny–mastrycht): Sedymentacja, paleogeografia i paleotektonika. *Prace Państw. Inst. Geol., Epikontynentalny perm i mezozoik w Polsce*, 153: 386–397.
- Leginowicz A., 2016. Identyfikacja sweet spotów w poszukiwaniach złóż niekonwencjonalnych. *Nafta-Gaz*, 71(4): 223–229. DOI: 10.18668/NG.2016.04.01.
- Li D., Sarai S., Jiao Z., Zhang Y., 2021. CO<sub>2</sub> injection strategies for enhanced oil recovery and geological sequestration in a tight reservoir: An experimental study. *Fuel*, 284. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119013.
- Matyja B.A., 2009. Development of the Mid-Polish Trough versus Late Jurassic evolution in the Carpathian Foredeep area. *Geological Quarterly*, 53(1): 49–62.
- Matyja B.A., Barski M., 2007. Stratygrafia górnej jury podłoża zapadliska przedkarpacciego. *Tomy Jurajskie*, 4: 39–50.
- Moryc W., 2018. Utwory jury środkowej przedgórza Karpat na obszarze Wadowice–Busko–Rzeszów, południowa Polska. *Prace Państw. Inst. Geol.*, 205: 1–55.
- Moryc W., Jachowicz M., 2000. Utwory prekambryjskie w rejonie Bochnia–Tarnów–Dębica. *Przegląd Geologiczny*, 48(7): 601–606.
- 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 zesp.), 2016. Dokumentacja wyników badań sejsmicznych. Temat: Przetwarzanie i interpretacja danych sejsmicznych 3D rok 2015. *Archiwum PGNiG S.A., Warszawa*.
- Ogbamikhumi A., Igbini N., 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.
- Olszewska B., 1999. Biostratygrafia neogenu zapadliska przedkarpacciego w świetle nowych danych mikropaleontologicznych. *Prace Państw. Inst. Geol.*, 168: 9–28.
- Świetlik B., 2013. Opracowanie mikropaleontologiczne i mikrofacjalne próbek z odwiertu Wadowice Dolne-1. [W:] Dokumentacja wyników otworu poszukiwawczego Wadowice Dolne-1. *Archiwum PGNiG S.A., Warszawa*.
- Świetlik B., Urbaniec A., Hejnar J., Bobrek L., 2011. Nowe odkrycie tytońskich tintinnidów w rejonie Sędziszowa Małopolskiego. *Jurassica IX, Małogoszcz 06–08.09.2011, Materiały konferencyjne: 7–26*.
- Tarkowski R., 2005. Geologiczna sekwestracja CO<sub>2</sub>. *Studia, Rozprawy, Monografie*, 132. *Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków*.
- 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., Polakowski T., Sierant H., Wąsiel M., 2013. Rola utworów triasu w mezo-paleozoicznym systemie naftowym przedgórza Karpat w rejonie Dąbrowa Tarnowska–Mielec–Dębica. *Wiadomości Naftowe i Gazownicze*: 1(177): 4–7.
- Veeken P.C.H., Silva M., 2004. Seismic inversion methods and some of their constraints. *First Break*, 22: 15–38, DOI: 10.3997/1365-2397.2004011.
- Walia R., Brandt K., Duthie R., Whittaker R., Malterre E., Bell P., 2005. New concepts for borehole and VSP data integration in seismic data processing. *First Break*, 23(6): 83–87. DOI: 10.3997/1365-2397.23.6.26573
- Żelaźniewicz A., Aleksandrowski P., Buła Z., Karnkowski P.H., Konon A., Oszczytko N., Ślęczka A., Żaba J., Żyto K., 2011. Regionalizacja tektoniczna Polski. *Komitet Nauk Geologicznych PAN, Wrocław*.
- Żelaźniewicz A., Buła Z., Fanning M., Seghedi A., Żaba J., 2009. More evidence on Neoproterozoic terranes in southern Poland and southeastern Romania. *Geological Quarterly*, 53(1): 93–124.



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 inżynierjno-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)