

Przykład interpretacji sejsmostratygraficznej i tektonostratygraficznej utworów miocenu z obszaru centralnej części zapadliska przedkarpackiego

Example of seismostratigraphic and tectonostratigraphic interpretation of the Miocene sediments from the central part of the Carpathian Foredeep

Anna Łaba-Biel, Andrzej Urbaniec, Kinga Filipowska-Jeziorek

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Szczegółowe rozpoznanie paleośrodowiska sedymentacji utworów formacji z Machowa w późnym badenie i sarmacie jest nadal stosunkowo niewielkie pomimo regionalnego rozprzestrzenienia i rozpoznania profilu tej formacji w licznych otworach wiertniczych. Nowe dane sejsmiczne o wysokiej rozdzielczości, uzyskane w ramach zdjęcia sejsmicznego 3D wykonanego w roku 2015, pozwoliły na niekonwencjonalne podejście do interpretacji, oparte na założeniach metodyki stratygrafii sekwencji w powiązaniu z interpretacją tektonostratygraficzną oraz analizą atrybutów sejsmicznych. W wyniku przeprowadzonych badań możliwe było wyeksponowanie całego szeregu informacji, które przy użyciu standardowych metod interpretacyjnych były najczęściej niedostrzegalne lub pomijane. Zaprezentowany w niniejszym artykule przykład tego typu interpretacji obejmuje środkową część profilu formacji z Machowa w centralnej części zapadliska przedkarpackiego (rejon usytuowany pomiędzy Dąbrową Tarnowską a Dębicą). Na podstawie interpretacji sejsmostratygraficznej możliwe było wskazanie elementów architektury depozycyjnej typowych dla klastycznych basenów sedymentacyjnych, które genetycznie powiązane są z ciągami systemów depozycyjnych. Interpretacja diagramu Wheelera wykazała istnienie wielu luk stratygraficznych, które są wynikiem erozji osadów lub odpowiadają okresom braku sedymentacji. W obrębie analizowanego segmentu mioceńskiego basenu sedymentacyjnego udokumentowano zmienny w czasie, transgresywno-regresywny charakter sedymentacji, związany zarówno z eustatycznymi zmianami poziomu morza, jak i z lokalną aktywnością tektoniczną. Generalnie największą masę dostarczanego materiału stanowiły osady transportowane z kierunku południowego, jednak w profilu obecne są także sekwencje zbudowane z heterolitów, w obrębie których dostawa materiału następowała naprzemiennie z dwóch różnych kierunków (tj. od N lub NW oraz od S). Interpretacja zapisu atrybutów sejsmicznych pozwoliła na zidentyfikowanie różnego typu elementów paleośrodowiska, takich jak delty warkoczowe, delty stożkowe, kanały i loby rozwinięte w strefach wypłaszczeń skłonu czy też stożki basenowe. W obrębie badanej części profilu utworów formacji z Machowa wyróżniono kilkanaście jednostek tektonostratygraficznych różniących się pod względem budowy strukturalnej i stylu tektonicznego. W morfologii utworów miocenu w tej strefie uwagę zwraca pozytywny element strukturalny, sąsiadujący od strony NW i SE ze strefami obniżonymi. W obrazie chronostratygraficznym tego elementu widoczne są asymetryczne struktury kształtem przypominające fałdy oraz szereg drobnych uskoków, świadczących o niestabilności tektonicznej tego elementu. Zaproponowana metodyka oparta na analizie obrazu chronostratygraficznego i diagramu Wheelera, w połączeniu z interpretacją tektonostratygraficzną, pozwoliła na szczegółową rekonstrukcję paleośrodowiska sedymentacji oraz odtworzenie historii depozycyjnej i tektonicznej analizowanego segmentu basenu zapadliska przedkarpackiego.

Słowa kluczowe: miocen, zapadlisko przedkarpackie, interpretacja sejsmostratygraficzna, interpretacja tektonostratygraficzna, atrybuty sejsmiczne.

ABSTRACT: Recognition of the paleoenvironment of sedimentation of the Machów Formation during the Late Baden and Sarmatian is still poorly understood, despite its regional spreading and recognition of the profile of this formation in numerous wells. New high-resolution 3D seismic data acquired in 2015 allowed for an unconventional approach to interpretation, based on the assumptions of the sequence stratigraphy methodology in combination with tectonostratigraphic interpretation and seismic attribute analysis. The research revealed a range of information that was most often overlooked by standard interpretative methods. An example of this type of interpretation covering a middle part of the Machów Formation profile in the central part of the Carpathian Foredeep (the area between Dąbrowa Tarnowska and Dębica cities) is presented in this paper. Based on seismostratigraphic interpretation it was possible to identify elements of depositional architecture typical of clastic sedimentary basins that are genetically related to depositional systems tracts.

Autor do korespondencji: A. Łaba-Biel, e-mail: anna.laba-biel@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 31.03.2022 r. Zatwierdzono do druku: 18.07.2022 r.

Interpretation of the Wheeler diagram showed the existence of many hiatuses that are the result of sediments erosion or correspond to periods of no sedimentation. Within the analyzed segment of the Miocene sedimentary basin, a time-varying, transgressive-regressive character of sedimentation was evidenced, related to both eustatic sea-level changes and local tectonic activity. In general, the largest portion of delivered material was transported from the south; however, sequences composed of heteroliths are also present in the profile, where material was delivered alternately from two different directions (i.e., from N or NW and from S). Seismic attributes interpretation enabled identification of different types of paleoenvironmental elements such as braided-deltas, fan-deltas, intraslope channels and lobes, and basin fans. In the analyzed part of the Machów Formation profile several tectonostratigraphic units were distinguished that differ in their structural framework and tectonic style. The morphology of the Miocene formations in the study area is marked by a positive structural element adjacent to the NW and SE with depressed zones. The chronostratigraphic image shows asymmetric fold-like structures and a series of minor faults indicating tectonic instability of this element. The proposed approach based on chronostratigraphic image and Wheeler diagram analysis in combination with tectonostratigraphic interpretation allowed for detailed recognition of sedimentary paleoenvironment as well as reconstruction of depositional and tectonic history of the analyzed segment of the Carpathian Foredeep basin.

Key words: Miocene, Carpathian Foredeep, seismostratigraphic interpretation, tectonostratigraphic interpretation, seismic attributes.

Wstęp

Kompleksy skalne reprezentujące typowe dla utworów miocenu kolektory silikoklastyczne, często heterolitowe, są na ogół bardzo trudne do interpretacji. Skomplikowany model facjalny utworów miocenu w centralnej części zapadliska przedkarpackiego, charakteryzujący się często dynamicznymi zmianami oraz dużym, chociaż nie zawsze oczywistym wpływem procesów tektonicznych na sedymentację i konfigurację basenu sedymentacyjnego, wymaga szczegółowego podejścia do interpretacji obrazu sejsmicznego. Stosowane powszechnie metody interpretacji, opartej zarówno na danych otworowych, jak też na standardowej korelacji sejsmicznej, często okazują się niewystarczające do odtworzenia wielu szczegółów budowy mioceńskiego basenu sedymentacyjnego zapadliska przedkarpackiego. W celu bardziej precyzyjnego określenia możliwości lokalizacji obiektów interesujących pod kątem poszukiwawczym, jak również prawidłowego zdefiniowania ich zasięgów niezbędne okazuje się odtworzenie skomplikowanej architektury depozycyjnej basenów sedymentacyjnych, a także zrozumienie procesów zachodzących w zróżnicowanych facjalnie kompleksach osadowych (Zeng, 2018). Najbardziej pomocnym narzędziem pozwalającym uzyskać tego typu informacje jest metoda stratygrafii sekwencji.

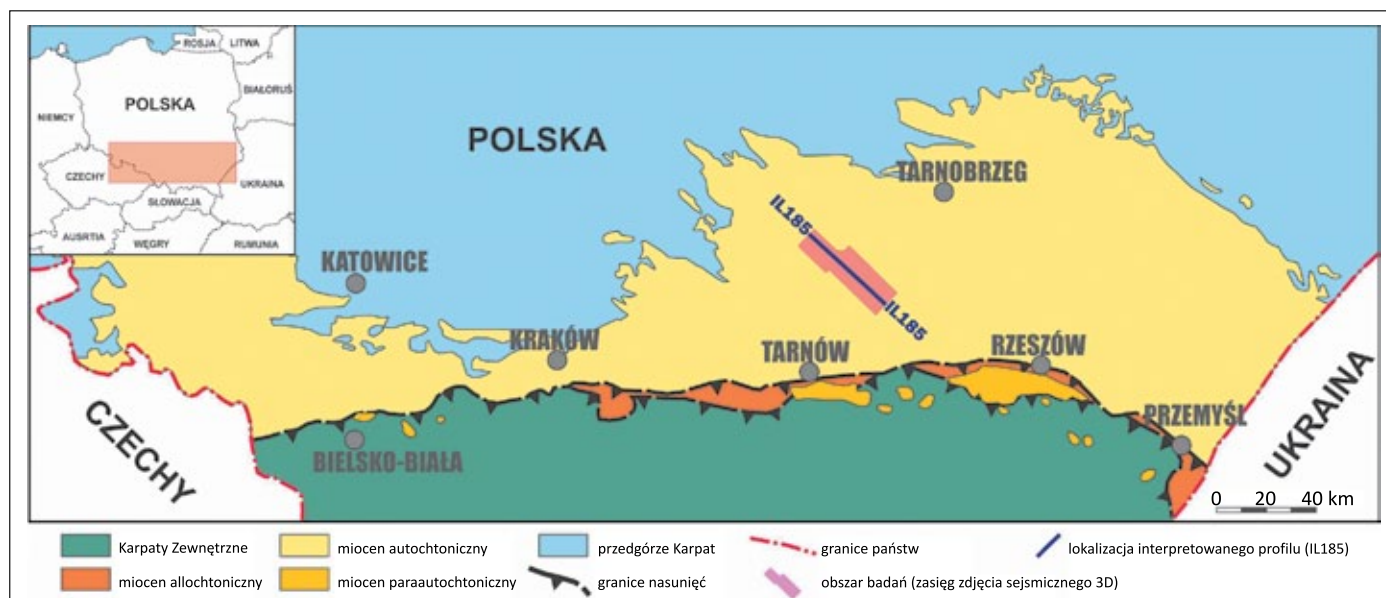
Dużym utrudnieniem w zastosowaniu wspomnianej metody stratygrafii sekwencji może być zbyt niska rozdzielczość obrazu sejsmicznego. Sekwencje mioceńskie w centralnej części zapadliska przedkarpackiego wykazują znaczne wertykalne i horyzontalne zróżnicowanie pod względem litologii, miąższości i położenia w basenie sedymentacyjnym, a dane sejsmiczne o niskiej rozdzielczości nie mogą być wykorzystane do wiarygodnego zdefiniowania tych sekwencji, gdyż w obrębie jednego refleksu sejsmicznego może zmieścić się nawet kilka „zdarzeń sejsmicznych” (Zeng, 2018). Z uwagi na dynamiczną zmienność facjalną utworów miocenu, jak również ich niekiedy znaczne zaangażowanie tektoniczne próby przeniesienia

wysokorozdzielczych informacji geologicznych uzyskanych na podstawie interpretacji profilowań geofizyki otworowej ze znacznie oddalonych od siebie otworów wiertniczych na dane sejsmiczne często nie przynoszą oczekiwanych rezultatów i nie przyczyniają się w znaczący sposób do odtworzenia architektury depozycyjnej basenu sedymentacyjnego.

W ramach prezentowanej pracy do szczegółowej rekonstrukcji konfiguracji basenu sedymentacyjnego, uwzględniającej poszczególne elementy paleośrodowiska sedymentacji, wykorzystano seismostratygraficzną analizę obrazu chronostratygraficznego i diagramu Wheelera (*vide* Qayyum et al., 2015; McDonough et al., 2013) w powiązaniu z analizą atrybutów sejsmicznych.

Celem niniejszej pracy jest przybliżenie możliwości interpretacji kompleksów skalnych o skomplikowanej budowie geologicznej na podstawie wspomnianych wyżej metod. Uzyskane w trakcie prac interpretacyjnych wyniki sugerują, że do prawidłowego odtworzenia budowy geologicznej kompleksu silikoklastycznych utworów miocenu w basenie zapadliska przedkarpackiego, zidentyfikowania poszczególnych sekwencji oraz szczegółowego odtworzenia historii tektonicznej obszaru konieczne jest podejście chronostratygraficzne, które w przypadku tego typu osadów powinno być stosowane powszechnie.

Analizy utworów miocenu z różnych rejonów polskiej części zapadliska przedkarpackiego bazujące na metodzie stratygrafii sekwencji opartej na analizie danych otworowych lub sejsmicznych są stosunkowo nieliczne. W ciągu ostatnich dekad ukazało się zaledwie kilkanaście publikacji poświęconych zagadnieniom interpretacji utworów miocenu z wykorzystaniem wspomnianych metod, w tym prace: Jędrzejowskiej-Zwinczak i Połtowicza (1994), Krzywca (1997, 2001), Porębskiego (1999), Dziadzia (2000), Porębskiego i Steela (2003), Porębskiego et al. (2003); Dziadzia et al. (2006), Porębskiego i Warchoła (2006), Pietsch et al. (2010), Łaby-Biel i Smółki-Gnutek (2016a, 2016b), Drozda (2017) oraz Łaby-Biel et al. (2020).



Rysunek 1. Położenie obszaru badań na tle zasięgu zapadliska przedkarpackiego w Polsce; zasięgi jednostek geologicznych wg Porębskiego i Warchoła (2006)

Figure 1. Location of the study area against the range of the Carpathian Foredeep in Poland; ranges of geological units according to Porębski and Warchoła (2006)

Zarys budowy geologicznej rejonu

Obszar badań zlokalizowany jest w południowej Polsce, w centralnej części zapadliska przedkarpackiego (rysunek 1), w strefie pomiędzy Dąbrową Tarnowską a Dębicą. Budowa geologiczna analizowanego rejonu, z podziałem na poszczególne piętra strukturalne, omówiona została szczegółowo we wcześniejszych publikacjach (Urbaniec et al., 2019, 2020; Urbaniec, 2021), dlatego też w niniejszym artykule przedstawiono ją jedynie w sposób skrótowy.

Najniższe piętro strukturalne w obszarze badań reprezentowane jest przez serię neoproterozoicznych skał anchimeta-morficznych. Wyniki analiz mikropaleontologicznych przeprowadzonych na próbkach z otworów wiertniczych wskazują na późnoediakarski wiek tej serii (Moryc i Jachowicz, 2000; Buła et al., 2008; Żelaźniewicz et al., 2009; Jachowicz-Zdanowska, 2011). Środkowe piętro strukturalne tworzą skały mezo-paleozoiczne o znacznej sumarycznej miąższości, wynoszącej do około 2000 m. W południowej części rejonu badań bezpośrednio na utworach ediakarskich zalegają osady dolnego paleozoiku (ordowiku i syluru). Cechują się one słabym stopniem rozpoznania geologicznego, a ich stosunkowo niewielkie miąższości (rzędu kilkudziesięciu metrów) oraz zasięg przestrzenny są słabo udokumentowane przez głębokie otwory wiertnicze (vide Moryc, 1996; Moryc i Nehring-Lefeld, 1997; Buła i Habryn, 2008). Wyżej w profilu leżą ilasto-piaszczyste osady lądowe reprezentujące utwory dewonu dolnego, na ogół o niewielkich miąższościach, rzędu kilku metrów, oraz seria 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 (vide 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). Osady podewaporatowe reprezentowane są głównie przez serią ilasto-mułowcową zaliczaną do formacji skawińskiej, o miąższości rzędu kilkunastu–kilkudziesięciu metrów. Badeńska seria ewaporatowa w obszarze badań reprezentowana jest przez gipsy i anhydryty. Jej geneza ma związek z kryzysem salinarnym, zapoczątkowanym prawdopodobnie dość gwałtownym obniżeniem poziomu morza w wyniku globalnego ochłodzenia (Báldi, 2006; de Leeuw et al., 2010; Karami et al., 2011). Nadewaporatowe osady silikoklastyczne, zaliczane do formacji z Machowa (Alexandrowicz et al., 1982), zajmują największą część profilu utworów miocenu

autochtonicznego w analizowanym rejonie zapadliska przedkarpacciego. Cechą charakterystyczną tej formacji jest jej znaczne zróżnicowanie facjalne, horyzontalne i wertykalne, obserwowane zarówno w profilach otworów wiertniczych, jak i w zapisie sejsmicznym.

Charakterystyka danych i metodyka interpretacji

Dane sejsmiczne

Szczegółową analizę sejsmostratygraficzną i tektonostratygraficzną silikoklastycznych utworów miocenu autochtonicznego z obszaru centralnej części zapadliska przedkarpacciego zaprezentowano na wybranym profilu sejsmicznym pochodzącym ze zdjęcia sejsmicznego wykonanego na tym terenie w roku 2015 (przy zastosowaniu zarówno metody wibratorowej, jak i dynamitowej). Ze względu na celowo zaprojektowane parametry akwizycji analizowane zdjęcie cechuje się znacznie większą rozdzielczością sejsmiczną (zwłaszcza w obrębie utworów miocenu, kredy i stropowych partii jury) niż wcześniejsze zdjęcia sejsmiczne, wykonane w sąsiedztwie analizowanego rejonu. Uzyskana większa rozdzielczość danych sejsmicznych pozwoliła na udokumentowanie wielu szczegółów budowy geologicznej tego, dotąd słabo rozpoznanego w kontekście facjalnym i paleośrodowiskowym rejonu zapadliska przedkarpacciego.

Lokalizację analizowanego zdjęcia, obejmującego obszar około 150 km² (łącznie z przylegającym od NW i wspólnie przetworzonym w Geofizyce Kraków SA zdjęciem archiwalnym z roku 1998), przedstawiono na rysunku 1.

Charakterystyka metodyki stratygrafii sekwencji

Sejsmiczna interpretacja obrazu chronostratygraficznego i diagramu Wheelera to narzędzia interpretacyjne pozwalające na zrozumienie i wiarygodną szczegółową rekonstrukcję architektury depozycyjnej basenu sedimentacyjnego. Metoda ta jest szczególnie pomocna w interpretacji utworów silikoklastycznych charakteryzujących się niewielkimi miąższościami poszczególnych sekwencji depozycyjnych (poniżej rozdzielczości sejsmiki), dużą różnorodnością facjalną, zmiennością kierunków dostawy materiału osadowego do basenu sedimentacyjnego, a także dostrzegalnymi efektami oddziaływania procesów tektonicznych.

W celu odtworzenia obrazu chronostratygraficznego cały trójwymiarowy wolumen sejsmiczny poddawany jest postprocessingowi z wykorzystaniem procedury identyfikacji upadów warstw (ang. *dip-layer*). Najbardziej istotnym etapem prac interpretacyjnych jest dokładna selekcja sekcji sejsmicznych z obrazu 3D, na których konstruowane są obrazy chronostratygraficzne. Azymut linii wytypowanych do interpretacji

powinien być zgodny z głównymi kierunkami depozycji analizowanych formacji skalnych oraz odzwierciedlać zależność geometryczną występującą w basenie sedimentacyjnym. Sekcje sejsmiczne z obliczonymi horyzontami chronostratygraficznymi, które umożliwiają rekonstrukcję historii depozycji, obliczane są w bramce czasowej, która może być wyznaczona zarówno przez cięcia czasowe, jak też przez wybrane horyzonty sejsmiczne, odpowiadające konkretnym granicom stratygraficznym (de Bruin et al., 2007; de Groot et al., 2010). Zasadniczo bramka ta powinna obejmować większy zakres czasowy, a nie odnosić się ściśle do interwału, który ma być objęty interpretacją. Takie postępowanie pozwala na uniknięcie błędów interpretacyjnych podczas korelacji, zwłaszcza w obszarach nierozpoznanych wierceniami. Dysponując zestawem horyzontów równoczesowych z zachowaniem prawidłowej sukcesji depozycyjnej, można skonstruować diagram Wheelera. Transformacja do domeny Wheelera związana jest z rozprostowaniem horyzontów równoczesowych i przypisaniem ich do względnej geologicznej skali czasu (Ligtenberg et al., 2006; de Bruin et al., 2007). Diagram Wheelera jest obliczany w celu identyfikacji i wizualizacji epizodów sedimentacyjnych, lateralnych zasięgów jednostek litostratygraficznych, hiatusów (zdarzeń erozyjnych lub okresów braku depozycji) oraz kierunków transportu materiału (*vide* Ligtenberg et al., 2006; Qayyum et al., 2012).

Każdy refleks w obrazie sejsmicznym związany jest z konkretną pozycją w sekwencji depozycyjnej, a każdy horyzont chronostratygraficzny odpowiada konkretnemu epizodowi sedimentacyjnemu w interpretowanym basenie, związanemu z wahaniami względnego poziomu morza (WPM). Stosowana metodyka stratygrafii sekwencji polega na przesłedzeniu ważniejszych granic sekwencyjnych, takich jak granice sekwencji (SB1 oraz SB2) oraz powierzchnie maksymalnego zalewu (msf). Zdefiniowanie najważniejszych relacji geometrycznych w obrębie interpretowanych utworów miocenu w oparciu o obraz chronostratygraficzny i diagram Wheelera pozwala wyinterpretować ciągi systemów depozycyjnych względnego poziomu morza (WPM) odzwierciedlające zmienność warunków paleośrodowiska. W ramach opracowania w obrazie sejsmicznym zidentyfikowane zostały ciągi systemów depozycyjnych wysokostanowych (HST), transgresywnych (TST), niskostanowych (LST) oraz ciągi wymuszonej regresji (FSST). Nastęstwo wspomnianych ciągów definiuje typy poszczególnych sekwencji. Modele rozwoju sekwencji depozycyjnych, wraz z klasycznymi schematami rozwoju i przekrojami przez różnego typu środowiska sedimentacyjne (np. deltowe), przedstawione zostały m.in. w pracach Neala et al. (1993), Catuneanu (2006), Catuneanu et al. (2011), Zecchina i Catuneanu (2017). Wykonana interpretacja horyzontów równoczesowych oraz diagramu Wheelera

bazuje na założeniach stratygrafii sekwencji oraz na modelach depozycyjnych opracowanych dla klastycznych basenów sedymentacyjnych (Morse, 1994; Catuneanu, 2006).

Charakterystyka metodyki tektonostratygraficznej

Śledzenie ciągłości horyzontów równowiekowych w odtworzeniu obrazu chronostratygraficznego ma zasadnicze znaczenie dla rozpoznania historii tektonicznej basenu sedymentacyjnego (Watkinson et al., 2007; Haqiqie et al., 2018). Zaobserwowane przzerwania ciągłości horyzontów równoczesowych mogą wskazywać na różne zjawiska, takie jak brak sedymentacji bądź też efekty oddziaływania procesów erozyjnych lub tektonicznych (Nikishin i Kopaeovich, 2009; Qayyum et al., 2015). Integracja metodyki stratygrafii sekwencji z interpretacją tektonostratygraficzną pozwala na podzielenie interpretowanego interwału na nadrzędne jednostki strukturalne, cechujące się odmiennym stylem tektonicznym. Często jednostki te odpowiadają megasekwencjom, rozumianym jako pakiety osadów zdeponowanych podczas głównych faz rozwoju basenu sedymentacyjnego (Nikishin i Kopaeovich, 2009; McDonough et al., 2013; Ramirez, 2016). Tym samym jednostki tektonostratygraficzne korespondują najczęściej z wydarzeniami regionalnymi odpowiadającymi poszczególnym fazom (kompresyjnym i ekstensyjnym) rozwoju basenu (Mantilla et al., 2013; Kenyon, 2016; Haqiqie et al., 2018). Podstawowa wiedza na temat geologii danego rejonu w połączeniu ze szczegółową interpretacją sekwencji depozycyjnych pozwala na prawidłowe zdefiniowanie głównych mechanizmów wpływających na obecny obraz strukturalny analizowanych utworów.

Atrybuty sejsmiczne

W ramach prowadzonych prac dokonano obliczeń wybranych atrybutów sejsmicznych spośród zestawu atrybutów dostępnych w oprogramowaniu Petrel. Obliczenia wykonano na danych sejsmicznych w wersji czasowej (po migracji czasowej przed składaniem). Spośród szeregu obliczonych atrybutów za najbardziej pomocne do celów interpretacji środowisk sedymentacyjnych uznano: *RMS Amplitude*, *Sweetness*, *Relative Acoustic Impedance* (RAI), *Average Energy*, *Variance* oraz *Dominant Frequency*. Dla poszczególnych atrybutów testowane były różne skale kolorów w celu wyboru możliwie najbardziej optymalnego wariantu, uwypuklającego jak najwięcej szczegółów budowy geologicznej analizowanego kompleksu. Ponadto w kolejnym etapie prac interpretacyjnych wykorzystano mapy powstałe w wyniku połączenia dwóch lub nawet trzech atrybutów objętościowych, takich jak *Relative Acoustic Impedance* (RAI), *Sweetness* czy *Variance*, co pozwoliło na bardziej szczegółowe odtworzenie niektórych elementów architektury depozycyjnej interpretowanego basenu sedymentacyjnego.

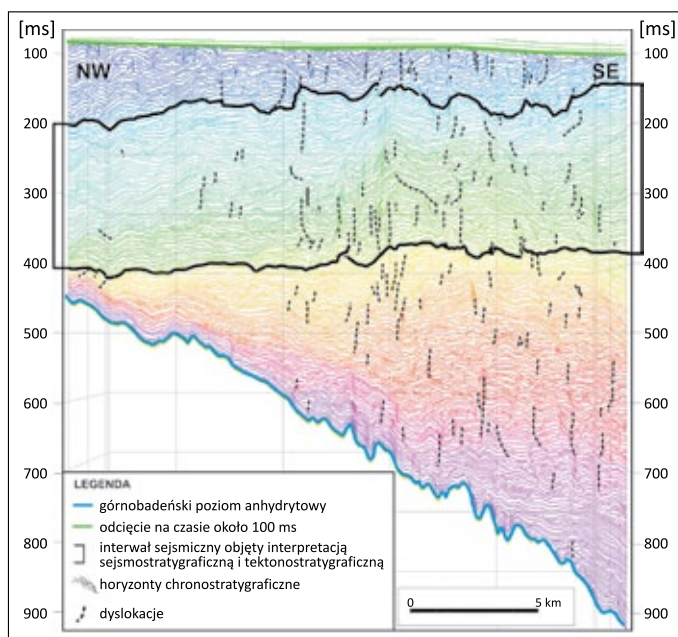
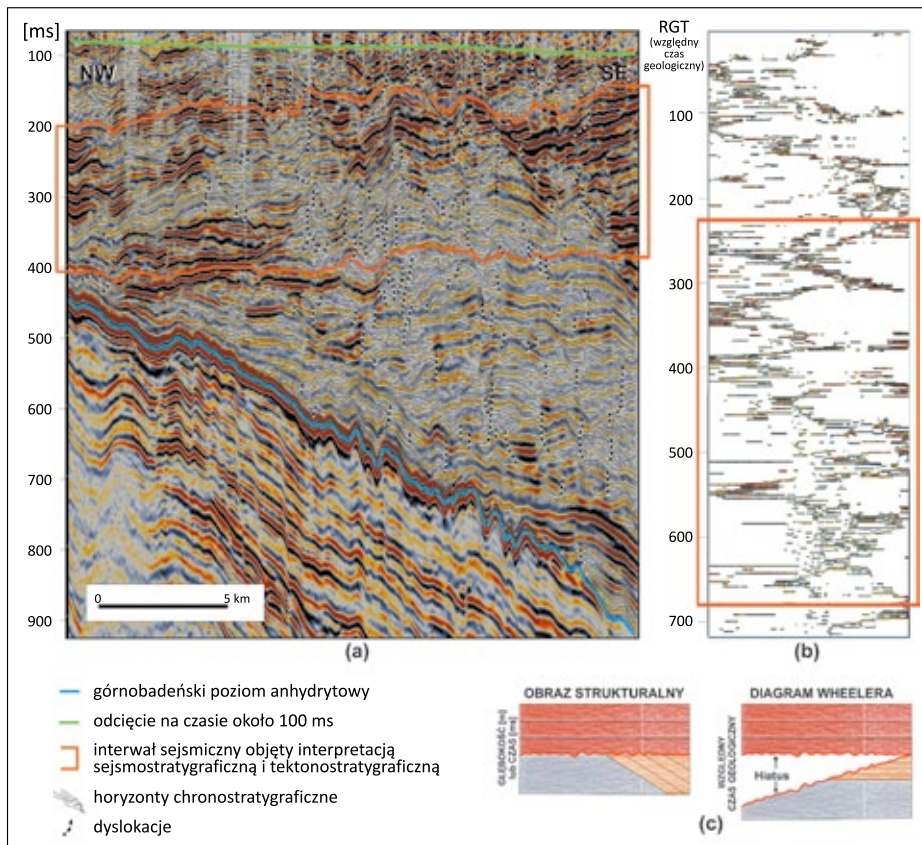
Obliczenie obrazu chronostratygraficznego i diagramu Wheelera

Punktem wyjścia do przeprowadzenia analizy sejsmostratygraficznej i tektonostratygraficznej utworów silikoklastycznych w środkowej części profilu formacji z Machowa w rejonie objętym badaniami było wybranie właściwego kierunku interpretowanego przekroju sejsmicznego, tak aby przebiegał on zgodnie z generalnym kierunkiem transportu materiału osadowego w analizowanym basenie. Obraz horyzontów równoczesowych oraz diagram Wheelera skonstruowano wzdłuż linii sejsmicznej 185, o kierunku przebiegu NW-SE. Obliczeń dokonano dla całego kompleksu utworów silikoklastycznych miocenu, usytuowanego pomiędzy granicą sejsmiczną związaną ze stropem górnobadeńskiego poziomu anhydrytowego a odcięciem na czasie około 100 ms (rysunek 2). Objęcie analizą chronostratygraficzną tak dużego i zróżnicowanego litofacjalnie kompleksu pozwoliło na zdefiniowanie głównych faz rozwoju analizowanego segmentu basenu sedymentacyjnego zapadliska przedkarpackiego w miocenie, jak również na wytypowanie odpowiedniego interwału czasowego do dalszej interpretacji sejsmostratygraficznej. Szczegółowa interpretacja sejsmostratygraficzna przeprowadzona została w obrębie płytszej części profilu miocenijskiej sukcesji osadowej, tj. w interwale czasowym od około 200 ms do około 400 ms (rysunek 2). Należy podkreślić, że kolory poszczególnych horyzontów równoczesowych prezentowanych na obrazie chronostratygraficznym odpowiadają generalnie następstwu kolejnych epizodów sedymentacyjnych (rysunek 3).

Interpretacja sejsmostratygraficzna

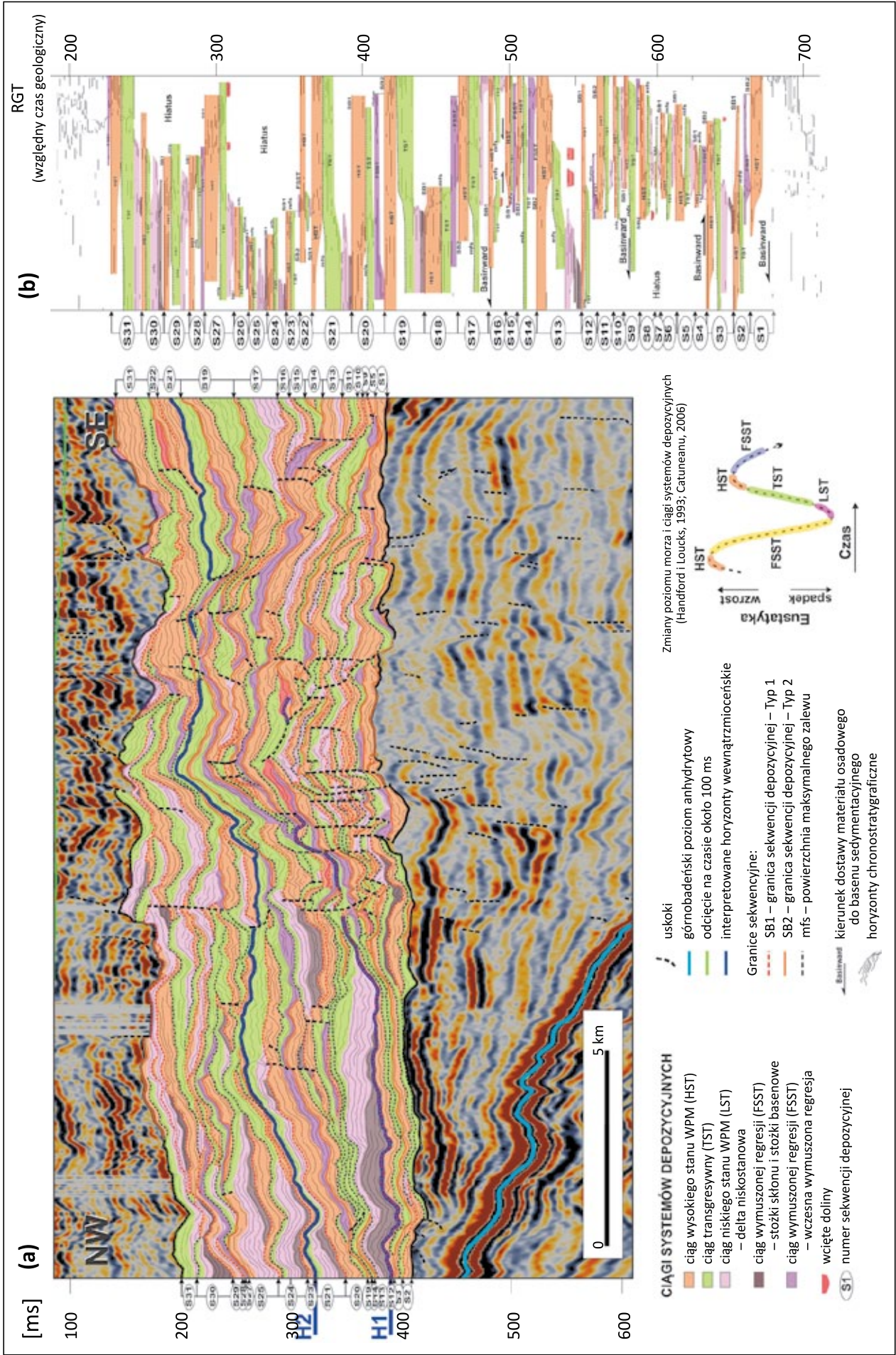
W interwale poddanym szczegółowej interpretacji sejsmostratygraficznej, obejmującym środkową część profilu formacji z Machowa, przeprowadzono analizę konfiguracji, ciągłości oraz typów kontaktów horyzontów równoczesowych w obrazie chronostratygraficznym. Na diagramie Wheelera horyzonty równoczesowe wykazują następstwo hierarchiczne, a sposób ich ułożenia, interpretowany w kierunku depozycji, pozwala zdefiniować poszczególne ciągi systemów depozycyjnych WPM oraz sekwencje depozycyjne. W obrębie analizowanej części miocenijskiej sukcesji osadowej zidentyfikowano i prześledzono 31 sekwencji depozycyjnych (rysunek 4a), charakteryzujących się dużym zróżnicowaniem miąższościowym oraz zmiennością geometrii i kierunków dostawy materiału terygenicznego do basenu sedymentacyjnego.

Dzięki zastosowaniu analizy sejsmostratygraficznej, opartej na metodyce stratygrafii sekwencji, możliwe było wskazanie elementów architektury depozycyjnej typowych dla



klastycznych basenów sedymentacyjnych, które genetycznie powiązane są z ciągami systemów depozycyjnych (LST, FSST, TST oraz HST). W ramach interpretacji wyznaczono i prześledzono granice sekwencji typu pierwszego (SB1) oraz drugiego (SB2), jak również charakterystycznych poziomów maksimum zalewu (mfs), co w konsekwencji umożliwiło rozróżnienie dwóch typów sekwencji depozycyjnych (sekwencje typu 1 oraz typu 2).

Interpretacja diagramu Wheelera wykazała w analizowanym profilu istnienie wielu luk stratygraficznych o lokalnym lub regionalnym rozprzestrzenieniu (rysunek 4b). Ujawnione w procesie interpretacji luki stratygraficzne mogły powstać w wyniku erozji zdeponowanych wcześniej osadów, jak również mogą one odpowiadać okresom braku sedymentacji. Co więcej, duża liczba hiatusów obserwowana w centralnej i południowej części interpretowanego profilu sejsmicznego



Rysunek 4. Szczegółowa interpretacja sejsmostratygiczna obrazu chronostratygicznego (a) oraz diagramu Wheelera (b)
Figure 4. Detailed seismostratigraphic interpretation of chronostratigraphic image (a) and Wheeler diagram (b)

może świadczyć o znacznej różnorodności procesów sedymentacji i erozji zachodzących w obrębie analizowanego basenu. Różnorodność ta jest z pewnością wynikiem zmieniających się w czasie warunków sedymentacji, kierunków dostawy materiału osadowego, a także aktywności tektonicznej obszaru. Największe luki sedymentacyjne stwierdzono w północno-zachodniej części analizowanego przekroju, a ich obecność może świadczyć o czasowym braku dostawy materiału osadowego do części basenu sedymentacyjnego.

W obrębie analizowanego segmentu basenu sedymentacyjnego zapadliska przedkarpackiego główną masę dostarczanego materiału stanowiły najprawdopodobniej osady transportowane z kierunku południowego. Sekwencje depozycyjne charakteryzujące się największym zasięgiem występowania oraz często znacznymi miąższościami (rzędu 30–60 m) deponowane były okresowo, co najprawdopodobniej miało związek z kolejnymi fazami aktywności orogenu karpackiego, usytuowanego na południe od obszaru badań. W okresach pomiędzy depozycją wspomnianych wyżej sekwencji dochodziło często do częściowej przebudowy tektonicznej analizowanego segmentu basenu sedymentacyjnego, z czym związana była zmiana charakteru sedymentacji oraz gwałtowna zmiana miejsc depozycji głównej masy osadów (najczęściej z przemieszczeniem w kierunku północnym).

Innym charakterystycznym elementem rozpoznany w obrębie interpretowanej części profilu są pakiety zbudowane z heterolitów (np. sekwencje S4–S11), o na ogół niewielkich miąższościach oraz lokalnym rozprzestrzenieniu. Dostawa materiału osadowego w obrębie tego typu sekwencji następowała najprawdopodobniej naprzemiennie z dwóch różnych kierunków, tj. od strony północnej lub północno-zachodniej (np. w obrębie sekwencji S4–S8) oraz z południa (np. w sekwencjach S9–S11). Można przypuszczać, że obszarem alimentacji dla opisanych sekwencji heterolitowych była centralna część obszaru badań, która okresowo ulegała procesom rotacji, częściowego wypiętrzania i związanej z tym erozji.

Na podstawie przeprowadzonej interpretacji można stwierdzić, że w analizowanym segmencie miocenijskiego basenu sedymentacyjnego zapadliska przedkarpackiego udokumentowano zmienny w czasie, transgresywno-regresywny charakter sedymentacji, związany zarówno z eustatycznymi zmianami poziomu morza, jak i z lokalną aktywnością tektoniczną. W analizowanym profilu utworów miocenu wyinterpretowano zarówno pakiety osadów reprezentujących ciągi wysokiego stanu poziomu morza (HST) (oznaczone kolorem pomarańczowym na rysunku 4), jak też pakiety osadów ciągów transgresywnych (TST) (oznaczone kolorem zielonym na rysunku 4). Obydwa wymienione typy osadów związane są głównie z rozbudową strefy szelfowej wraz z jej krawędzią. W północno-zachodniej części interpretowanego profilu, ponad utworami

wysokostanowymi i transgresywnymi, wyraźnie zaczynają dominować utwory ciągów wymuszonej regresji (FSST, kolor brązowy) i niskiego stanu względnego poziomu morza (LST, kolor różowy). W środkowej części analizowanego przekroju zidentyfikowano również formy o charakterze wciętych dolin (kolor czerwony).

Charakterystycznym elementem wyinterpretowanym w obszarze badań są też ciągi wymuszonej regresji (wczesna wymuszona regresja, FSST, oznaczone kolorem fioletowym na rysunku 4), należące do sekwencji depozycyjnych typu 2. Po etapie sedymentacji tych utworów dochodziło najczęściej do lokalnych zmian w architekturze depozycyjnej analizowanego segmentu basenu sedymentacyjnego.

Na podstawie przeprowadzonej interpretacji sejsmostratygraficznej możliwe było odtworzenie szczegółowej historii depozycji osadów silikoklastycznych w analizowanym segmencie basenu zapadliska przedkarpackiego.

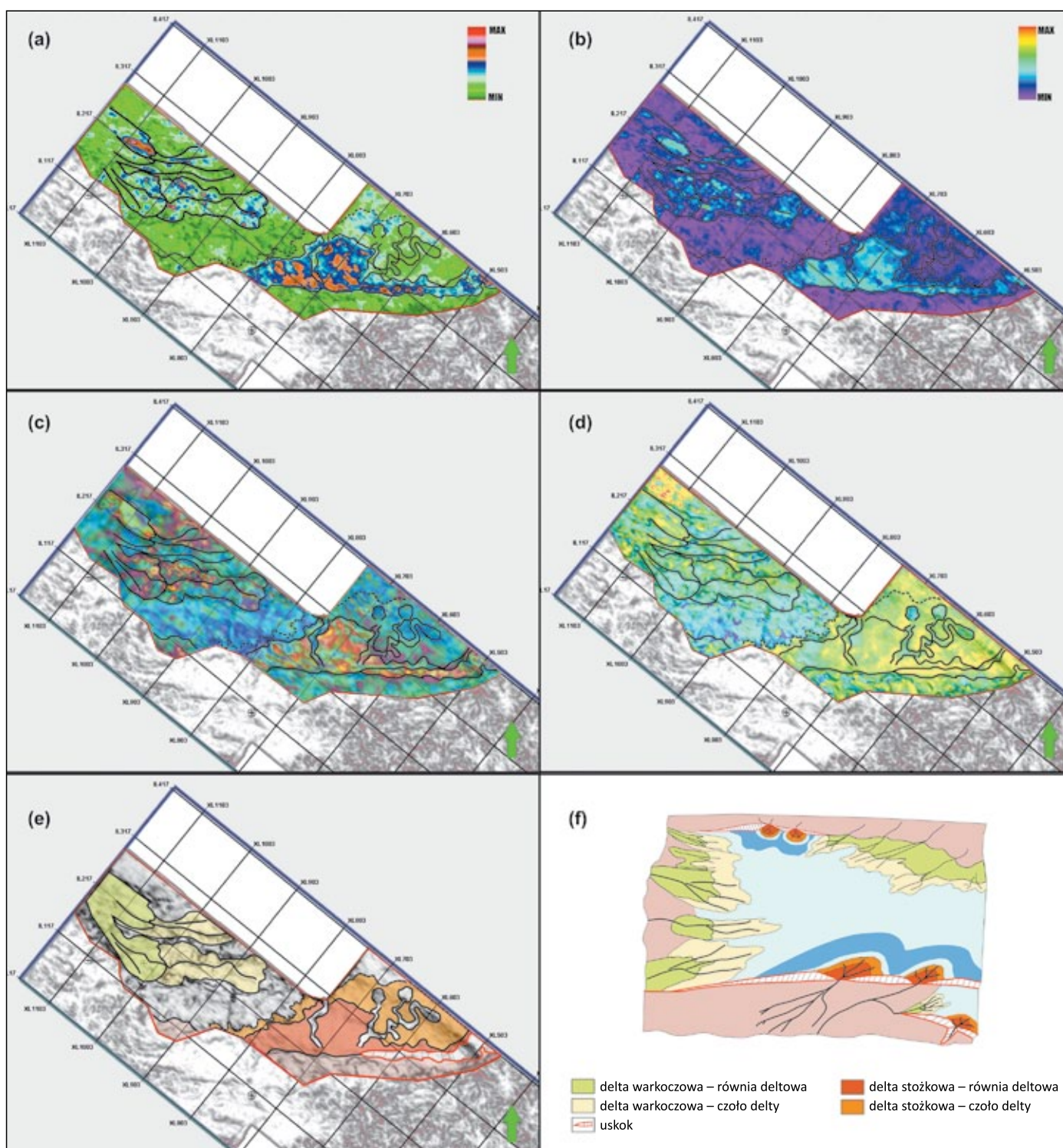
Analiza atrybutów sejsmicznych

Do obliczeń atrybutów sejsmicznych wykorzystano wyinterpretowane lokalnie dwa wewnątrzmiocenijskie horyzonty sejsmiczne (H1 oraz H2 – rysunek 4). Horyzonty te zostały skorelowane w ten sposób, aby połączyć pakiety osadów zdeponowanych w jednym ciągu systemów depozycyjnych. Przebieg horyzontu H1 odzwierciedla granicę maksymalnego zalewu (mfs) zlokalizowaną w obrębie sekwencji S13, natomiast horyzontu H2 – granicę sekwencji typu pierwszego, związaną ze spągami sekwencji S23.

Mapy atrybutowe dla wyinterpretowanych horyzontów obliczone zostały zarówno wzdłuż powierzchni tych horyzontów, jak też w różnych bramkach czasowych (maksymalnie od +10 do –10 ms). Interpretacja uzyskanych wyników dała możliwość szczegółowego prześledzenia zmian elementów paleośrodowiska w obrębie jednego ciągu systemów depozycyjnych.

Analiza map atrybutowych powstałych na podstawie wyinterpretowanych horyzontów wewnątrzmiocenijskich (H1 i H2) pozwoliła na prześledzenie i odtworzenie zasięgów przestrzennych niektórych komponentów paleośrodowiska (rysunek 5), w tym zwłaszcza elementów typowych dla ciągów wysokostanowych oraz niskostanowych. Najbardziej interesujące wyniki uzyskano przy zastosowaniu takich atrybutów jak: *RMS Amplitude*, *Relative Acoustic Impedance (RAI)*, *Sweetness*, *Average Energy*, *Variance*, *Dominant Frequency* oraz na mapach powstałych w wyniku połączenia dwóch lub trzech atrybutów sejsmicznych (np. *Extract Value* ze *Sweetness* czy *RAI*, *Sweetness* oraz *Variance*) (rysunek 5).

Na podstawie interpretacji map atrybutowych zidentyfikowano m.in. takie elementy paleośrodowiska jak delty



Rysunek 5. Mapy atrybutów sejsmicznych obliczonych dla powierzchni horyzontu H1 wraz z interpretacją: (a) *Extract Value* ze *Sweetness*; (b) *RMS Amplitude*; (c) *Relative Acoustic Impedance* \times *Sweetness* \times *Variance*; (d) *Variance* \times *Dominant Frequency*; (e) *Variance* z wyinterpretowanymi elementami architektury depozycyjnej; (f) model depozycyjny (na podstawie Jia et al., 2019, zmodyfikowany)

Figure 5. Seismic surface attribute maps calculated along the H1 horizon with interpretation: (a) *Extract value* from *Sweetness*; (b) *RMS Amplitude*; (c) *Relative Acoustic Impedance* \times *Sweetness* \times *Variance*; (d) *Variance* \times *Dominant Frequency*; (e) *Variance* with interpreted depositional architecture elements; (f) depositional model (modified after Jia et al., 2019)

warkoczowe, delty stożkowe, kanały i loby rozwinięte w strefach wypłaszczeń skłonu, stożki basenowe. Elementy te definiują różnego typu środowiska związane ze strefą krawędziową,

skłonem oraz strefą basenową. Jednym z najbardziej charakterystycznych elementów rozpoznanych na podstawie interpretacji wykonanej dla niższego horyzontu (H1) są wydłużone formy

morfologiczne, które można tutaj interpretować jako delty warkoczowe. Formy te poprzecinane są szeregiem długich, w miarę prostych i rozgałęziających się w kierunku czoła delty kanałów (rysunek 5). Tego typu delty rozwijają się w rejonach o niewielkim stopniu nachylenia i powstają w strefach, w których systemy barów i przeplatających ich kanałów wkraczają do zbiornika wodnego (McPherson et al., 1987; Jia et al., 2019). W strefie skłonu wyróżniono z kolei formę o wachlarzowatym kształcie, która zinterpretowana została jako delta stożkowa. Delta ta rozwinęła się w bezpośrednim sąsiedztwie wyinterpretowanej strefy uskokowej (rysunek 5). Bliskość stromych krawędzi jest charakterystyczną cechą modelu sedimentacji tego typu delt (*vide* McPherson et al., 1987; Nemeč i Steel, 1988; Jia et al., 2019).

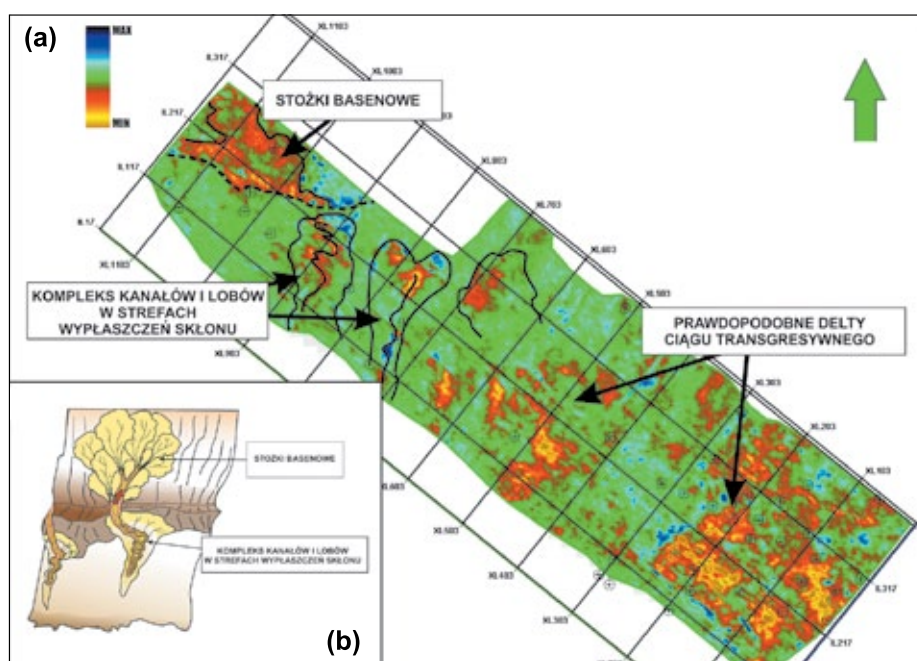
Wydaje się, że rozkład amplitud w obrębie wyższego zinterpretowanych horyzontów (H2) w północno-zachodniej części obszaru badań może wskazywać na obecność pakietów osadów o charakterze turbidytowym, zdeponowanych w formie stożków basenowych (rysunek 6), stanowiących zapis depozycji w warunkach wymuszonej regresji (FSST). Ponadto w strefie prawdopodobnych lokalnych wypłaszczeń, usytuowanych w obrębie skłonu, wyinterpretowano kompleks meandrujących kanałów wraz z lobami depozycyjnymi (rysunek 6). W części południowo-wschodniej obszaru badań dominują najprawdopodobniej utwory deponowane w środowisku deltowym, związane z ciągiem transgresywnym, jednak ze względu na brak kontekstu regionalnego, związany z ograniczonym zasięgiem zdjęcia sejsmicznego 3D, nie jest

możliwe bardziej szczegółowe zdefiniowanie poszczególnych elementów architektury depozycyjnej.

Interpretacja tektonostratygraficzna

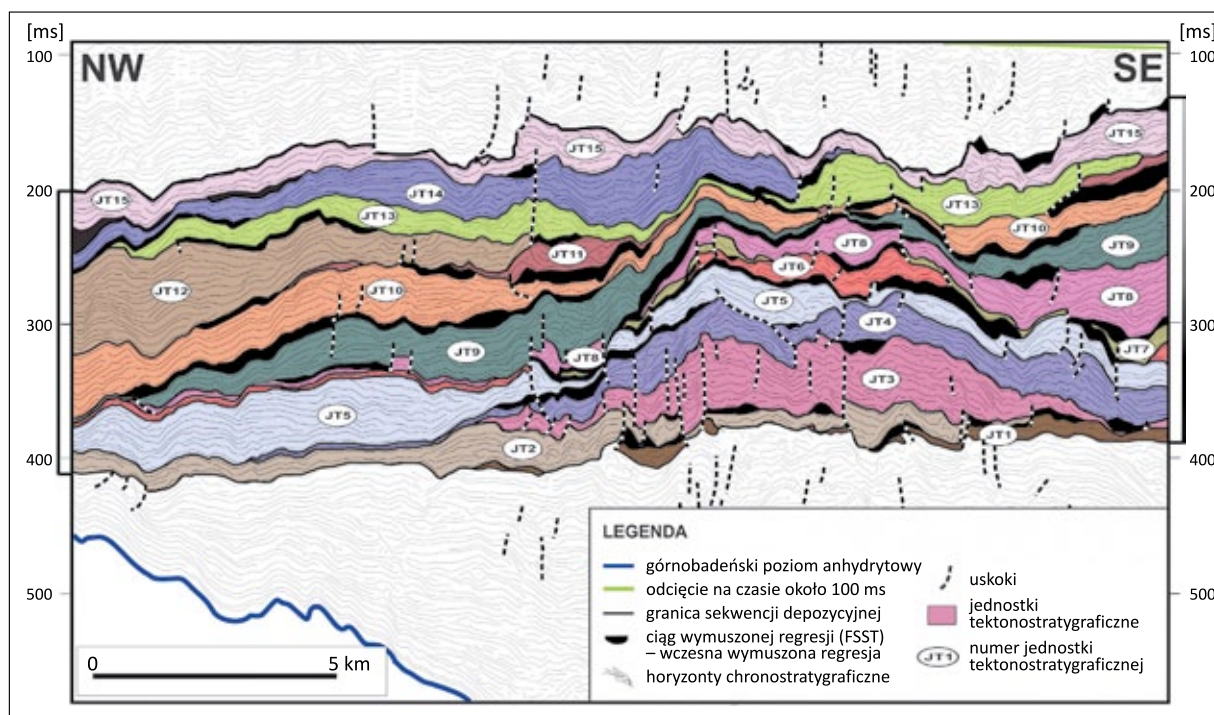
W trakcie analizy obrazu horyzontów chronostratygraficznych zaobserwowano obecność wyraźnie zaznaczających się powierzchni nieciągłości, które zinterpretowane zostały jako płaszczyzny dyslokacji (zaznaczone czarnymi przerywanymi liniami na rysunku 7). Warto podkreślić, że zdecydowana większość tych powierzchni uskokowych ma charakter lokalny i na ogół nie są one widoczne w obrazie sejsmicznym. Na podstawie przeprowadzonej interpretacji w obrębie badanej części profilu utworów formacji z Machowa wyróżniono szereg jednostek tektonostratygraficznych, wyraźnie różniących się pod względem budowy strukturalnej i stylu tektonicznego (rysunek 7). Każda z wyróżnionych jednostek jest charakteryzowana przez odmienny obraz chronostratygraficzny, związany ze specyficznym układem horyzontów równoczesowych na diagramie Wheelera, jak również przez specyficzny układ powierzchni dyslokacji. Co więcej, można przypuszczać, że każda z wyróżnionych jednostek tektonostratygraficznych jest ściśle związana z innym etapem historii geologicznej interpretowanego rejonu (*vide* Mantilla et al., 2013; Ramirez, 2016; Haqique et al., 2018).

Jak już wcześniej wspomniano, w analizowanym segmencie basenu sedimentacyjnego na podstawie analizy diagramu



Rysunek 6. (a) Mapa atrybutu powierzchniowego *Extract Value* z *Relative Acoustic Impedance* dla powierzchni horyzontu H2 wraz z interpretacją; (b) model depozycyjny (na podstawie Hadler-Jacobsen et al., 2005 oraz Brooks et al., 2018; zmodyfikowany)

Figure 6. (a) Seismic surface attribute map *Extract Value* from *Relative Acoustic Impedance* calculated along the H2 horizon with interpretation; (b) depositional model (modified after Hadler-Jacobsen et al., 2005 and Brooks et al., 2018)



Rysunek 7. Wyinterpretowane jednostki tektonostratigraficzne na tle obrazu chronostratigraficznego
Figure 7. Interpreted tectonostratigraphic units in the background chronostratigraphic image

Wheeler zidentyfikowano szereg luk stratygraficznych. Luki te, zlokalizowane pomiędzy wyróżnionymi jednostkami tektonostratigraficznymi, najczęściej świadczą o lokalnych, a niekiedy również regionalnych etapach przebudowy basenu sedymentacyjnego. Ponadto stwierdzono, że strop każdej ze zidentyfikowanych jednostek tektonostratigraficznych jest tożsamy z granicą sekwencji typu drugiego (SB2). W obrazie chronostratigraficznym stropy tych jednostek wyznaczane są przez niezgodności erozyjne i kątowe, a także przez pewne kombinacje kontaktów refleksów sejsmicznych, zwłaszcza typu downlap oraz onlap (*vide* Nikishin i Kopaeovich, 2009). Powyżej każdej granicy sekwencji SB2 deponowane były utwory związane z wczesnym etapem wymuszonej regresji (FSST, zakolorowane na czarno na rysunku 7). W obszarze badań depozycja tych utworów miała związek głównie ze zjawiskami spływów masowych i grawitacyjnych.

W centralnej części przekroju, zarówno w obrazie sejsmicznym, jak i chronostratigraficznym, w morfologii interpretowanej części profilu utworów miocenu wyraźnie widoczny jest pozytywny element strukturalny, zbudowany z sekwencji od S4 do S21. Zarówno od strony NW, jak i SE pakiety równoległych osadów znajdują się w wyraźnie obniżonych pozycjach względem wspomnianego elementu (rysunek 7). Od strony NW jest to związane z modelem sedymentacji, a ściślej z wyklinowywaniem się utworów poszczególnych sekwencji w kierunku centrum basenu sedymentacyjnego. Natomiast genezę morfologicznego obniżenia utworzonego

od strony SE wiązać można najprawdopodobniej z procesami kolapsu, rozwiniętymi na SE skłonie wspomnianego elementu strukturalnego. W obrazie chronostratigraficznym tego elementu widoczne są asymetryczne struktury, kształtem przypominające fałdy, oraz szereg drobnych uskoków, świadczących o niestabilności tektonicznej tego elementu, a ich charakter może wskazywać również na istotny udział procesów rotacji.

Należy podkreślić, że analiza obrazu chronostratigraficznego i diagramu Wheelera jednoznacznie wykazała, że serie skalne budujące element strukturalny i strefy obniżone złożone są z tych samych sekwencji (tj. utworów równoległych), powiązanych ze sobą genetycznie i zdeponowanych w czasie tych samych epizodów sedymentacyjnych.

Podsumowanie

Kompleks utworów silikoklastycznych miocenu nadewaporatowego w centralnej części zapadliska przedkarpackiego charakteryzuje się wciąż stosunkowo słabym stopniem rozpoznania geologicznego. Pomimo licznych publikacji poświęconych zagadnieniu rozwoju facjalnego tych utworów (np.: Jawor, 1983; Dziadzio et al., 1997, 2006; Porębski, 1999; Dziadzio, 2000; Mastalerz et al., 2006; Porębski i Warchoń, 2006; Krzywiec et al., 2008; Lis i Wysocka, 2012) nadal istnieje wiele luk w zakresie szczegółowej wiedzy dotyczącej paleośrodowiska sedymentacji oraz historii rozwoju poszczególnych

segmentów basenu sedymentacyjnego. Wraz z rozwojem nauki i metodyki pojawiają się nowe możliwości interpretacji danych sejsmicznych, pozwalające na nieco inne spojrzenie na badane utwory, a tym samym na wyeksponowanie informacji, które przy użyciu standardowych metod interpretacji były niedostrzegalne lub pomijane.

W niniejszym artykule zaproponowano podejście do interpretacji oparte na założeniach metody stratygrafii sekwencji przy wykorzystaniu analizy obrazu chronostratygraficznego i diagramu Wheelera. Istotnym elementem analizy sejsmostratygraficznej była korelacja horyzontów na profilach sejsmicznych, uwzględniająca przebieg wydzielonych sekwencji depozycyjnych w taki sposób, aby horyzonty te łączyły pakiety osadów zdeponowanych w jednym ciągu systemów depozycyjnych powiązanych ze sobą genetycznie. Przeprowadzone w kolejnym etapie połączenie interpretacji sejsmostratygraficznej z analizą atrybutów sejsmicznych pozwoliło na szczegółowe rozpoznanie zróżnicowania paleośrodowiska w analizowanym segmencie basenu sedymentacyjnego. Analiza tektonostratygraficzna wniosła wiele nowych informacji na temat historii rozwoju analizowanego basenu.

Przeprowadzone badania jednoznacznie wskazują, że w przypadku tego typu skomplikowanych kompleksów osadowych, o wyraźnie zaznaczającym się wpływie procesów tektonicznych na model depozycji, tylko połączona interpretacja sejsmostratygraficzna i tektonostratygraficzna daje możliwość poprawnego odtworzenia paleośrodowiska sedymentacji i historii depozycji w basenie sedymentacyjnym.

Na podstawie wykonanej interpretacji środkowej części profilu formacji z Machowa udokumentowano obecność szeregu sekwencji depozycyjnych o zróżnicowanej miąższości (rzędu od 8 m do 80 m) i zmiennym zasięgu przestrzennym. Generalnie w analizowanym profilu dominują sekwencje charakteryzujące się większymi miąższościami i znacznym rozprzestrzenieniem, zbudowane najprawdopodobniej z materiału osadowego dostarczanego z obszaru Karpat. W części centralnej obszaru badań pomiędzy opisanymi powyżej sekwencjami stwierdzono obecność utworów o charakterze heterolitowym. Sekwencje zbudowane z utworów heterolitowych cechują się stosunkowo niewielkimi miąższościami oraz rozprzestrzenieniem ograniczonym do obszaru wyniesienia strukturalnego. Co więcej, na podstawie przeprowadzonej analizy wykazano, że poszczególne sekwencje deponowane były w różnych kierunkach (NW oraz SE). Warto nadmienić, że obecność miąższych pakietów utworów heterolitowych o podobnym charakterze stwierdzono w analizowanym rejonie również w niższej części profilu formacji z Machowa (*vide* Urbaniec et al., 2019; Łaba-Biel et al., 2020).

Wykonana analiza tektonostratygraficzna wykazała, że historia tektoniczna badanego interwału związana jest nie tylko

z procesami regionalnymi, zachodzącymi w całym basenie mioceńskim zapadliska przedkarpackiego, ale również z lokalnymi przejawami tektoniki małoskalowej. Przeprowadzone badania pozwoliły na identyfikację hiatusów związanych ze zdarzeniami erozyjnymi lub okresami braku depozycji oraz licznych drobnych dyslokacji przecinających analizowane utwory, niewidocznych w obrazie sejsmicznym.

W centralnej części obszaru badań uwagę zwraca obecność pozytywnego elementu strukturalnego, który zarówno od strony NW, jak i SE sąsiaduje ze strefami wyraźnie obniżonymi strukturalnie. W obrazie chronostratygraficznym tej strefy widoczny jest szereg drobnych uskoków o lokalnym rozprzestrzenieniu. Charakter tego elementu i geometria wspomnianych dyslokacji sugerują, że wyniesienie to mogło powstać w wyniku ugięcia fleksuralnego rozwijającego się w analizowanym segmencie basenu sedymentacyjnego. Układ wyinterpretowanych uskoków w dużej mierze zbieżny jest z modelami zaprezentowanymi w pracy Li et al. (2018). Należy podkreślić, że większość z opublikowanych modeli przedstawia deformację utworów zalegających w podłożu przedgórskich basenów sedymentacyjnych na przedpolu nasuwającego się orogenu (np. w pracach Catuneanu et al. (1999), Catuneanu (2004), Pirouza (2018), Znađa et al. (2020)). W przedstawionym w niniejszym artykule przypadku strefa deformacji rozwinięta jest w utworach zdeponowanych w basenie przedgórskim (a więc w obrębie tej samej formacji). Genezę tego elementu wiązać można z naprężeniami wywołanymi przez nasuwający się od południa lub południowego zachodu górotwór karpacki.

Zaproponowana w pracy metodyka, oparta na analizie stratygraficznej obrazu chronostratygraficznego i diagramu Wheelera, daje możliwości bardziej szczegółowej rekonstrukcji konfiguracji basenu sedymentacyjnego z uwzględnieniem elementów paleośrodowiska. Ponadto na podstawie interpretacji obrazu chronostratygraficznego możliwe jest określenie głównych kierunków transportu materiału osadowego do basenu sedymentacyjnego. Omawiana metoda umożliwia także wyinterpretowanie niewielkich lokalnych dyslokacji, w niektórych przypadkach niewidocznych w obrazie sejsmicznym. Wykorzystując całość informacji uzyskanych w wyniku interpretacji obrazu chronostratygraficznego, można zrekonstruować pełną historię depozycyjną i tektoniczną analizowanego segmentu mioceńskiego basenu zapadliska przedkarpackiego.

Artykuł powstał na podstawie prac statutowych pt. *Analiza sejsmostratygraficzna kompleksu węglanowego górnej jury w obszarze centralnej części przedgórze Karpat*, nr zlecenia 0037/SR/2020, nr archiwalny DK-4100-0025/2020 oraz *Analiza sejsmostratygraficzna utworów miocenu w obszarze centralnej części zapadliska przedkarpackiego*; nr zlecenia 0103/SR/2021, nr archiwalny DK-4100-0091/2021.

Literatura

- Alexandrowicz S.W., Garlicki A., Rutkowski J., 1982. Podstawowe jednostki litostratygraficzne miocenu zapadliska przedkarpackiego. *Kwartalnik Geologiczny*, 26(2): 470–471.
- Báldi K., 2006. Paleocyanography and climate of the Badenian (Middle Miocene, 16.4–13.0 Ma) in the Central Paratethys based on foraminifera and stable isotope ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$) evidence. *International Journal of Earth Sciences*, 95(1): 119–142. DOI: 10.1007/s00531-005-0019-9.
- Brooks H.L., Hodgson D.M., Brunt R.L., Peakall J., Poyatos-Moré M., Flint S.S., 2018. Disconnected submarine lobes as a record of stepped slope evolution over multiple sea-level cycles. *Geosphere*, 14(4): 1753–1779. DOI: 10.1130/GES01618.1.
- Bruin G. de, McBeath K., Hemstra N., 2007. Unravelling a Carbonate System: Technical Advances in Seismic Sequence Stratigraphy. *First Break*, 25(5): 57–61. DOI: 10.3997/1365-2397.25.1107.27456.
- Buła Z., Habryn R. (red.), 2008. Atlas geologiczno-strukturalny paleozoicznego podłoża Karpat zewnętrznych i zapadliska przedkarpackiego; 1 : 300 000. *Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa*.
- Buła Z., Żaba J., Habryn R., 2008. Regionalizacja tektoniczna Polski – Polska południowa (blok górnośląski i małopolski). *Przegląd Geologiczny*, 56(10): 912–920.
- Catuneanu O., 2004. Retroarc foreland systems – evolution through time. *Journal of African Earth Sciences*, 38(3): 225–242. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2004.01.004.
- Catuneanu O., 2006. Principles of Sequence Similarity. *Elsevier, Alberta*.
- Catuneanu O., Galloway W.E., Kendall C.G.St.C., Miall A.D., Posamentier H.W., Strasser A., Tucker M.E., 2011. Sequence Stratigraphy: Methodology and Nomenclature. *Newsletters on Stratigraphy*, 44(3): 173–245. DOI: 10.1127/0078-0421/2011/0011.
- Catuneanu O., Sweet A.R., Miall A.D., 1999. Concept and styles of reciprocal stratigraphies: Western Canada foreland system. *Terra Nova*, 11(1): 1–8.
- Drozd A., 2017. Sekwencje depozycyjne w utworach miocenu autochtonicznego w rejonie Brzeska. *Nafta-Gaz*, 73(12): 928–934. DOI: 10.18668/NG.2017.12.03.
- Dziadzio P., 2000. Sekwencje depozycyjne w utworach badenu i sarmatu w SE części zapadliska przedkarpackiego. *Przegląd Geologiczny*, 48(12): 1124–1138.
- Dziadzio P., Liszka B., Maksym A., Staryszak G., 1997. Środowisko sedymentacji utworów miocenu autochtonicznego w brzeźnej strefie Karpat, a interpretacja geologiczno-złożowa w obszarze Husów – Albigowa – Krasne. *Nafta-Gaz*, 53(9): 407–414.
- Dziadzio P., Maksym A., Olszewska B., 2006. Sedymentacja utworów miocenu we wschodniej części zapadliska przedkarpackiego. *Przegląd Geologiczny*, 54(5): 413–420.
- Groot P. de, Huck A., Bruin G. de, Hemstra N., Bedford J., 2010. The Horizon Cube: A Step Change in Seismic Interpretation! *The Leading Edge*, 29(9): 1048–1055. DOI: 10.1190/1.3485765.
- Gutowski J., Urbaniec A., Złonkiewicz Z., Bobrek L., Świątklik B., Gliniak P., 2007. Stratygrafia górnej jury i dolnej kredy środkowej części przedpola polskich Karpat. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 426: 1–26.
- Hadler-Jacobsen F., Johannessen E.P., Ashton N., Henriksen S., Johnson S.D., Kristensen J.B., 2005. Submarine fan morphology and lithology distribution: a predictable function of sediment delivery, gross shelf-to-basin relief, slope gradient and basin topography. *Geological Society, London, Petroleum Geology Conference series*, 6: 1121–1145. DOI: 10.1144/0061121.
- Haqiqie F.A., Sunardi E., Ilmii N.N., Ginting A.S., 2018. Determination of Potential Hydrocarbon and Tectonostatigraphy Analysis Based on 2D Seismic in Padamarang Sub-Basin, Bone Basin, South Part of Sulawesi. *Journal of Geological Sciences and Applied Geology*, 2(6): 38–48.
- 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.
- Jasionowski M., 1997. Zarys litostratygrafii osadów mioceńskich wschodniej części zapadliska przedkarpackiego. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 375: 43–60.
- Jawor E., 1970. Wgłębna budowa geologiczna na wschód od Krakowa. *Acta Geologica Polonica*, 20(4): 715–769.
- Jawor E., 1983. Utwory miocenu między Krakowem a Dębicą. *Przegląd Geologiczny*, 31(12): 635–640.
- Jia L., Zhong D., Ji Y., Zhou Y., Liu J., Mi L., Li D., Yan R., Yi Z., Jia L., 2019. Architecture of tectonic sequences, depositional systems, and tectonic controls of the sedimentary fills of the rift-related Wenchang Formation in the Lufeng Depression, Pearl River Mouth Basin, China. *Geological Journal*, 54(4): 1950–1975. DOI: 10.1002/gj.3272.
- Jędrzejowska-Zwinczak H., Połtowicz S., 1994. Zastosowanie sejsmostratygrafii w analizie paleogeologicznej. *Nafta-Gaz*, 50(10): 419–437.
- Karami M.P., de Leeuw A., Krijgsman W., Meijer P.T., Wortel M.J.R., 2011. The role of gateways in the evolution of temperature and salinity of semi-enclosed basins: An oceanic box model for the Miocene Mediterranean Sea and Paratethys. *Global and Planetary Change*, 79(1–2): 73–88. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2011.07.011.
- Kenyon I.C., 2016. 4D Evolution and Inverted Fault Architecture of the Taranki Basin, Offshore New Zealand. *Independent project report submitted for the degree of Master of Science in Petroleum Geoscience, Royal Holloway University of London*.
- Krzywiec P., 1997. Large-scale tectono-sedimentary Middle Miocene history of the central and eastern Polish Carpathian Foredeep Basin – results of seismic data interpretation. *Przegląd Geologiczny*, 45(10): 1039–1053.
- Krzywiec P., 2001. Contrasting tectonic and sedimentary history of the central and eastern parts of the Polish Carpathian foredeep basin – results of seismic data interpretation. *Marine and Petroleum Geology*, 18(1): 13–38.
- Krzywiec P., Wysocka A., Oszczytko N., Mastalerz K., Papiernik B., Wróbel G., Oszczytko-Clowes M., Aleksandrowski P., Madej K., Kijewska S., 2008. Ewolucja utworów mioceńskich zapadliska przedkarpackiego w rejonie Rzeszowa (obszar zdjęcia sejsmicznego 3D Sokołów – Smolarzyny). *Przegląd Geologiczny*, 56(3): 232–244.
- Leeuw A. de, Bukowski K., Krijgsman W., Kuiper K.F., 2010. Age of the Badenian salinity crisis: impact of Miocene climate variability on the circum-Mediterranean region. *Geology*, 38(8): 715–718. DOI: 10.1130/G30982.1.
- Li T., Chen J., Thompson Jobe J.A., Burbank D.W., Cheng X., Xu J., Li Z., Zheng W., Zhang P., 2018. Active bending-moment faulting: geomorphic expression, controlling conditions, accommodation of fold deformation. *Tectonics*, 37: 2278–2306. DOI: 10.1029/2018TC004982.
- Ligtenberg H., Bruin G. de, Hemstra N., Geel C.R., 2006. Sequence Stratigraphic Interpretation in the Wheeler Transformed (Flattened) Seismic Domain. [W:] 68th European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2006, *EAGE 2006: Opportunities in Mature Areas*; 2006, 3: 1622–1626. DOI: 10.3997/2214-4609.201402337.

- Lis P., Wysocka A., 2012. Middle Miocene deposits in Carpathian foredeep: Facies analysis and implications for hydrocarbon reservoir prospecting. *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, 82: 239–253.
- Łaba-Biel A., Kwietniak A., Urbaniec A., 2020. Seismic Identification of Unconventional Heterogeneous Reservoirs Based on Depositional History – a Case Study of the Polish Carpathian Foredeep. *Energies*, 13, 6036. DOI: 10.3390/en13226036.
- Łaba-Biel A., Smółka-Gnutek P., 2016a. Horizon cube i diagram Wheelera – przykłady zastosowania w interpretacji obrazu sejsmicznego. *Prace Naukowe Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego*, 209: 533–537.
- Łaba-Biel A., Smółka-Gnutek P., 2016b. Detaliczna, geologiczna analiza obrazu sejsmicznego w oparciu o interpretację diagramu Wheelera i Horizon Cube. *Prace Naukowe Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego*, 209: 223–229.
- Mantilla O., Castellanos J., Ramirez V., Hurtado D., Rubio C., 2013. Tectono-stratigraphic events of the Northern Caribbean Offshore, Colombia. *Proceedings of the AAPG International Conference and Exhibition, Cartagena, Colombia*, 8–11 September 2013; *AAPG Search and Discovery Article #30292*.
- Maścierz K., Wysocka A., Krzywiec P., Kasiński J., Aleksandrowski P., Papiernik B., Ryzner-Siupik B., Siupik J., 2006. Sukcesja osadowa miocenu w rejonie zrębu Ryszkowej Woli (obszar Sieniawa–Rudka), zapadlisko przedkarpackie: wyniki facjalnej i stratygraficznej interpretacji danych wiertniczych oraz sejsmiki 3D. *Przegląd Geologiczny*, 54(4): 333–342.
- McDonough K.J., Bouanga E., Pierard C., Horn B., Emmet P., Gross J., Danforth A., Sterne N., Granath J., 2013. Wheeler-Transformed 2D Seismic Data Yield Fan Chronostratigraphy of Offshore Tanzania. *The Leading Edge*, 32(2): 162–170. DOI: 10.1190/tle32020162.1.
- McPherson G.J., Shanmugam G., Moiola R.J., 1987. Fan-deltas and braid deltas: varieties of coarse-grained deltas. *Geological Society of America Bulletin*, 99: 331–340.
- Morse D.G., 1994. Siliciclastic reservoir rocks. [W:] Magoon L.B., Dow W.G. The petroleum system – from source to trap. *AAPG Memoir*, 60: 121–139. DOI: 10.1306/M60585C6.
- 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.
- Neal J., Risch D., Vail P., 1993. Sequence stratigraphy – a global theory for local success. *Oilfield Review*, 1: 51–62.
- Nemec W., Steel R.J., 1988. What is a fan delta and how do we recognize it? [W:] Nemec W., Steel R.J. (eds.). *Fan Deltas: Sedimentology and Tectonic Settings*. Blackie, Glasgow: 3–13.
- Nikishin A.M., Kopaevich L.F., 2009. Tectonostratigraphy as a Basis for Paleotectonic Reconstructions. *Moscow University Geology Bulletin*, 64(2): 65–74. DOI: 10.3103/s014587520902001x.
- Pietsch K., Porębski S.J., Marzec P., 2010. Wykorzystanie sejsmostratigrafii do rozpoznania rozkładu mioceńskich facji zbiornikowych w północno-wschodniej części zapadliska przedkarpackiego. *Geologia*, 36(2): 173–186.
- Pirouz M., 2018. Post-collisional deposits in the Zagros foreland basin: Implications for diachronous underthrusting. *International Journal of Earth Sciences (Geol. Rundsch)*, 107: 1603–1621. DOI: 10.1007/s00531-017-1561-y.
- Porębski S.J., 1999. Środowisko depozycyjne sukcesji nadewaporatowej (górnny baden) w rejonie Kraków–Brzesko (zapadlisko przedkarpackie). *Prace Państwowego Instytutu Geologicznego*, 168: 97–118.
- Porębski S.J., Pietsch K., Hodiak R., Steel R.J., 2003. Origin and sequential development of Badenian–Sarmatian clinofolds in the Carpathian Foreland Basin (SE Poland). *Geologica Carpathica*, 54(2): 119–136.
- Porębski S.J., Steel R.J., 2003. Shelf-margin deltas: their stratigraphic significance and relation to deepwater sands. *Earth-Science Reviews*, 62: 283–326. DOI: 10.1016/S0012-8252(02)00161-7.
- Porębski S., Warchoń M., 2006. Znaczenie przepływów hiperpyklnych i klinofold deltowych dla interpretacji sedimentologicznych formacji z Machowa (miocen zapadliska przedkarpackiego). *Przegląd Geologiczny*, 54(5): 421–429.
- Qayyum F., Catuneanu O., Groot P. de, 2015. Historical developments in Wheeler diagrams and future directions. *Basin Research*, 27(3): 336–350. DOI: 10.1111/bre.12077.
- Qayyum F., Groot P. de, Hemstra N., 2012. Using 3D Wheeler Diagrams in Seismic Interpretation – The Horizon Cube Method. *First Break*, 30(3): 103–109. DOI: 10.3997/1365-2397.30.3.56681.
- Ramirez F.A., 2016. Tectonostratigraphic Evolution of a Suprasalt Minibasin, Oligocene-Miocene Western Slope of the Gulf of Mexico. *Master's Thesis, University of Texas, El Paso, TX, USA*.
- 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.
- Watkinson M.P., Hart M.B., Joschi A., 2007. Cretaceous Tectonostratigraphy and the Development of the Cauvery Basin, Southeast India. *Petroleum Geoscience*, 13(2): 181–191. DOI: 10.1144/1354-079307-747.
- Zając R., 1984. Stratygrafia i rozwój facjalny dewonu i dolnego karbonu południowej części podłoża zapadliska przedkarpackiego. *Kwartalnik Geologiczny*, 28(2): 291–316.
- Zecchin M., Catuneanu O., 2017. High-Resolution Sequence Stratigraphy of Clastic Shelves VI: Mixed Siliciclastic-Carbonate Systems. *Marine and Petroleum Geology*, 88, 712–723. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2017.09.012.

- Zeng H., 2018. What is seismic sedimentology? A tutorial. *Interpretation*, 6(2): SD1–SD12. DOI: 10.1190/INT-2017-0145.1.
- Znad R.Kh., Al-Khatony S.E., Al-Sumaidaie M.A.H., 2020. Effect of tectonic setting on distribution of pelagic sediment unit (Shiranish Formation) in Zagros foreland basin. *Iraqi Geological Journal*, 53(2A): 105–119. DOI: 10.46717/igj.53.2A.8Rw-2020.08.08.
- 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



Mgr Anna ŁABA-BIEL
 Główny specjalista inżynierijno-techniczny
 w Zakładzie Sejsmiki
 Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
 ul. Lubicz 25 A
 31-503 Kraków
 E-mail: anna.laba-biel@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

OFERTA BADAWCZA ZAKŁADU GEOFIZYKI WIERTNICZEJ

- badania tomograficzne skał:
 - » trójwymiarowa wizualizacja i analiza wewnętrznej struktury przestrzeni porowej skał metodą mikrotomografii rentgenowskiej (micro-CT);
 - » tomografia metrowych odcinków skał, profilowanie zmian parametrów petrofizycznych rdzenia (porowatość, gęstość objętościowa);
- badania metodą jądrowego rezonansu magnetycznego:
 - » określanie rozkładu nasycenia wodą przestrzeni porowej próbek,
 - » generacja map T1-T2, szacowanie nasycenia wodą/węglowodorami,
 - » identyfikacja obecności substancji organicznej TOC;
 - » oznaczenie jakościowego i ilościowego składu mineralnego skał oraz wydzielonej frakcji ilastej na podstawie analizy rentgenowskiej;
- wyznaczanie zawartości naturalnych pierwiastków promieniotwórczych: uranu, toru i potasu w skałach, płuczkach wiertniczych i materiałach budowlanych;
- ocena elektrycznych parametrów skał (wskaźnika struktury porowej i zwilżalności);
- określanie zależności elektrycznej oporności właściwej płuczek wiertniczych od temperatury;
- ocena prędkości propagacji fal ultradźwiękowych w skałach, kamieniach cementowych i płuczkach wiertniczych;
- badanie przewodności cieplnej skał;
- wyznaczanie współczynnika przepuszczalności;
- badanie gęstości, gęstości właściwej i porowatości;
- interpretacja profilowań geofizyki wiertniczej w zakresie określenia litologii i parametrów zbiornikowych skał oraz ocena stanu zacementowania rur okładzinowych w otworach;
- badania serwisowe:
 - » pomiary składu chemicznego skał metodą fluorescencji rentgenowskiej XRF wykonywane w celu oceny składu mineralnego oraz analiz chemostratygraficznych,
 - » spektrometryczne pomiary gamma na rdzeniu wiertniczym: ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th , total gamma przy wykorzystaniu mobilnego urządzenia „Gamma Logger”.



Kierownik: mgr inż. Rafał Skupio Adres: ul. Bagrowa 1, 30-733 Kraków
 Telefon: 12 650 64 84 Faks: 12 653 16 65 E-mail: skupio@inig.pl



INSTYTUT NAFTY I GAZU
 – Państwowy Instytut Badawczy