

Analiza sejsmostratygraficzna utworów miocenu i ich podłoża w obszarach rozwoju paleodolin

Seismostratigraphic study of Miocene formations and their basement in paleovalley areas

Anna Łaba-Biel¹, Andrzej Urbaniec¹, Anna Kwietniak²

¹ Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

² Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

STRESZCZENIE: Głównym celem artykułu jest zaprezentowanie możliwości zastosowania interpretacji sejsmostratygraficznej do szczegółowego odtworzenia wpływu procesów tektonicznych na rozwój sedimentacji utworów miocenu w strefach paleodolin w centralnej części zapadliska przedkarpackiego, jak również do odtworzenia szczegółów budowy strukturalnej podłoża mezo-paleozoicznego i neoproterozoicznego. System paleodolin głęboko wciętych w utwory mezo-paleozoiczne stanowi charakterystyczny element budowy strukturalnej zapadliska przedkarpackiego. Do badań wykorzystano zdjęcie sejsmiczne 3D z obszaru centralnej części zapadliska o powierzchni 350 km². Jako podstawowych narzędzi interpretacyjnych użyto sejsmicznej interpretacji obrazu chronostratygraficznego oraz diagramu Wheelera. Skomplikowany model facjalny utworów miocenu, charakteryzujący się często dynamicznymi zmianami facji oraz wyraźnym wpływem procesów tektonicznych na sedimentację i konfigurację basenu sedimentacyjnego, wymaga szczegółowego podejścia do interpretacji obrazu sejsmicznego. Wykonane badania sejsmostratygraficzne i tektonostratygraficzne okazały się kluczowe dla zrozumienia relacji paleośrodowiskowych oraz odtworzenia historii rozwoju tektonicznego analizowanego segmentu basenu sedimentacyjnego zapadliska przedkarpackiego w miocenie. Na podstawie przeprowadzonych prac zidentyfikowano trzy serie różnowiekowych utworów (S1–S3) wypełniających paleodoliny. W SE części obszaru badań wyróżniono serię osadów miocenских (M1) zdeponowanych poza obszarami paleodolin, która w znacznym stopniu naśladuje układ strukturalny utworów podłoża paleozoicznego. Po etapie stosunkowo szybkiego wypełniania paleodolin oraz depozycji serii osadowej M1 w analizowanym segmencie basenu doszło do wyrównania paleoreliefu i rozpoczęła się depozycja miększej serii osadowej M2. Przeprowadzona analiza pozwoliła również na uzyskanie szczegółowych informacji na temat budowy strukturalnej i tektoniki utworów podłoża miocenu. W obrębie starszych pięter strukturalnych wyinterpretowano szereg dyslokacji i jednostek tektonicznych, wyraźnie różniących się charakterem i ograniczonych powierzchniami niezgodności kątowych. Metoda sejsmostratygraficzna oparta na interpretacji obrazów chronostratygraficznych pozwala na odtworzenie wielu szczegółów budowy geologicznej silnie zaburzonych tektonicznie utworów mezo-paleozoicznych oraz neoproterozoicznych, podczas gdy na standardowej wersji sejsmiki obraz w obrębie kompleksu neoproterozoicznego jest całkowicie nieczytelny.

Słowa kluczowe: zapadlisko przedkarpackie, paleodoliny, interpretacja sejsmostratygraficzna, horyzonty chronostratygraficzne, diagram Wheelera, miocen, neoproterozoik.

ABSTRACT: The primary objective of this paper is to present the possibilities of applying seismostratigraphic interpretation for a detailed reconstruction of the impact of tectonic processes on the sedimentation of Miocene formations in paleovalleys in the central part of the Carpathian Foredeep, as well as for a detailed reconstruction of the structural framework of the Meso-Palaeozoic and Neoproterozoic basement. The system of paleovalleys, deeply incised into Meso-Palaeozoic formations, is a characteristic element of the structural framework of the Carpathian Foredeep. This study was based on a 350 km² 3D seismic survey from the central part of the Carpathian Foredeep. Seismic interpretation of the chronostratigraphic image and the Wheeler diagram were used as basic interpretation tools. The complex facies model of the Miocene sediments, often characterised by dynamic changes in facies and a clear influence of tectonic processes on sedimentation and basin configuration, requires a detailed approach to seismic image interpretation. The seismostratigraphic and tectonostratigraphic studies performed were crucial for understanding paleoenvironmental relations and reconstructing the tectonic evolution of the analysed segment of the Carpathian Foredeep sedimentary basin during the Miocene. Based on the work carried out, three series of different-age sediments (S1–S3) filling the paleovalleys were identified. In the SE part of the study area, a series of Miocene sediments (M1) deposited outside the paleovalleys was identified, which closely follows the configuration of the Palaeozoic basement formations. After a phase of relatively rapid filling of paleovalleys and deposition of the M1 sedimentary series in the analysed basin segment, the paleorelief was smoothed, and deposition of the thicker M2 sedimentary series began. The analysis also provided detailed information on the structural framework and tectonics of the Miocene basement formations. A series of faults and tectonic units, clearly different in character and bounded by disconformities, were interpreted within the older structural stages.

Autor do korespondencji: A. Urbaniec, e-mail: andrzej.urbaniec@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 12.11.2024 r. Zatwierdzono do druku: 11.03.2025 r.

The seismostratigraphic method, based on the interpretation of chronostratigraphic images, enables the reconstruction of many details in the geological framework of the highly tectonically disintegrated Meso-Palaeozoic and Neoproterozoic formations, whereas in the standard seismic version, the image within the Neoproterozoic complex is completely illegible.

Key words: Carpathian Foredeep, paleovalleys, seismostratigraphic interpretation, chronostratigraphic horizons, Wheeler diagram, Miocene, Neoproterozoic.

Wstęp

System paleodolin głęboko wciętych w utwory mezo-paleozoiczne, a lokalnie nawet prekambryjskie, o kierunkach przebiegu z północnego zachodu na południowy wschód, stanowi jeden z najbardziej charakterystycznych elementów budowy strukturalnej zapadliska przedkarpacciego w rejonie pomiędzy Krakowem a Rzeszowem (Łapinkiewicz i Karpala, 1967; Połtowicz, 1998a, 1998b, 1999; Krzywiec, 2001). Ich geneza pierwotnie związana była z systemem rzeczny odwadniającym w paleogenie tzw. łąd małopolski, o generalnym trendzie nachylenia w kierunku południowym i południowo-wschodnim (Połtowicz, 1998a), jednak z czasem uległy one zalaniu i znacznemu pogłębieniu w warunkach podmorskich w wyniku intensywnych procesów erozyjnych. Paleodoliny wypełnione są zróżnicowanym pod względem litologicznym i facjalnym materiałem osadowym, z dużym udziałem osadów redeponowanych, powstałych w wyniku dosyć powszechnie zachodzących grawitacyjnych ruchów masowych (Shepard, 1951; Gradziński, 1957; Niemczyk, 2005; Deptuck i in., 2007).

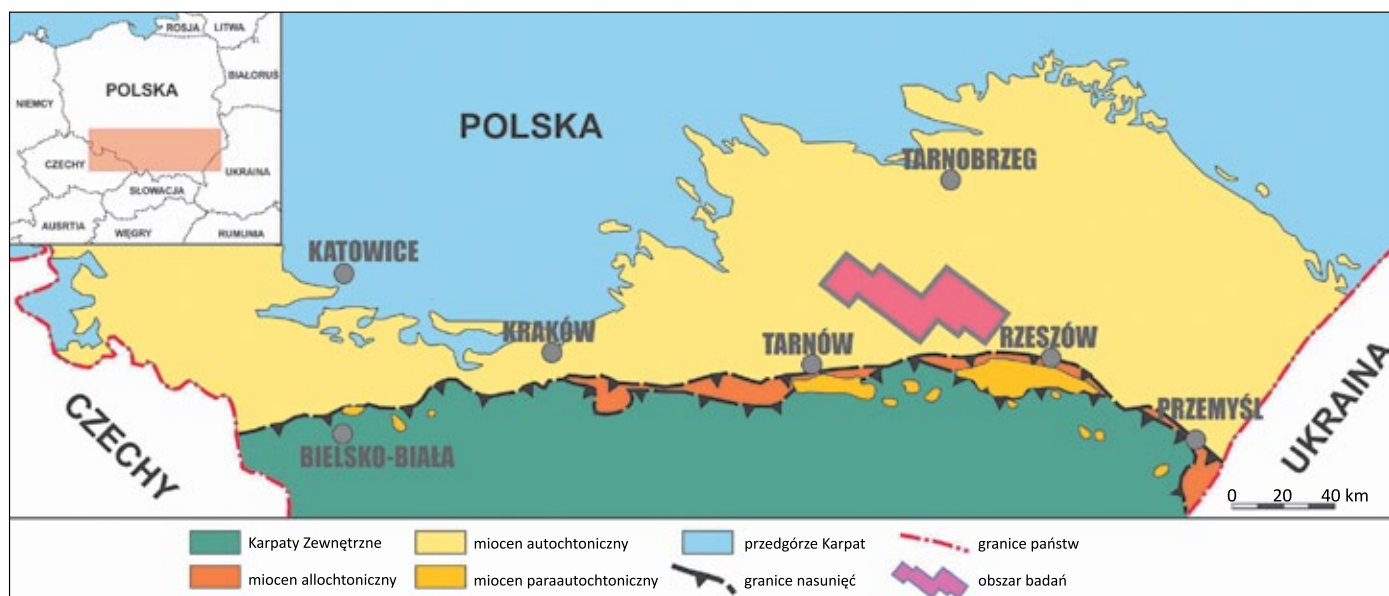
W ostatnich latach odnotowano wzrost zainteresowania strefami skłonów paleodolin w aspekcie prowadzonych prac związanych z poszukiwaniem węglowodorów. Należy jednak podkreślić, że ze względu na dosyć gwałtowne zmiany facjalne, małe miąższości sekwencji osadowych oraz obecność licznych nieciągłości i dyslokacji – budowa geologiczna i warunki sedymentacji utworów miocenu w tych strefach są bardzo trudne do interpretacji. Znajduje to odzwierciedlenie w dyskusji prowadzonej od lat przez wielu autorów, koncentrującej się wokół zagadnień interpretacji strukturalnej, litofacjalnej i stratygraficznej specyficznego typu formacji skalnych wypełniających paleodoliny (m.in.: Karnkowski i Głowacki, 1961; Połtowicz, 1994, 1999; Dziadzio i Jachowicz, 1996; Oszczytko, 1996, 1998; Karnkowski i Ozimkowski, 2001; Oszczytko i in., 2006; Krzywiec i in., 2008; Urbaniec i in., 2018, 2021).

Stosowane dotychczas klasyczne metody interpretacji sejsmicznej i otworowej okazują się często niewystarczające do pełnego zrozumienia złożonych relacji facjalnych zachodzących w basenie sedymentacyjnym w rejonie skłonów paleodolin, a co za tym idzie – do identyfikacji poszczególnych elementów architektury depozycyjnej. Wiąże się to z faktem, że na sedymentację utworów miocenu w tych obszarach w znaczący

sposób wpływa zróżnicowana morfologia podłoża, charakteryzująca się skomplikowanym paleoreliefem, dużymi deniwelacjami dna basenu oraz zmiennymi kierunkami rozciągłości stref osiowych poszczególnych paleodolin. Istotny wpływ na dynamiczne zmiany w paleoreliefie miocennskiego zbiornika sedymentacyjnego w przykrawędziowych strefach paleodolin miała również obecność bloków osuwiskowych (olistolitów) bądź też całych serii olistostromowych (Połtowicz, 1999; Urbaniec i in., 2021). Obecnie odtworzenie paleośrodowiska sedymentacji tego typu utworów, jak również zrozumienie procesów zachodzących w zróżnicowanych facjalnie kompleksach osadowych okazuje się niezbędne w aspekcie precyzyjnego określenia lokalizacji obiektów interesujących pod kątem poszukiwawczym, jak również prawidłowego zdefiniowania ich zasięgów (Zeng, 2018).

Skomplikowany model facjalny utworów miocenu w centralnej części zapadliska przedkarpacciego, 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 na profilach sejsmicznych. W związku z tym w INiG – PIB przeprowadzono badania sejsmostratygiczne i tektonostratygiczne w strefach krawędziowych paleodolin w centralnej części zapadliska przedkarpacciego, które okazały się kluczowe dla zrozumienia relacji paleośrodowiskowych oraz odtworzenia historii rozwoju tektonicznego basenu sedymentacyjnego w tym rejonie.

Sekwencje miocenne w centralnej części zapadliska przedkarpacciego wykazują znaczne wertykalne i horyzontalne zróżnicowanie pod względem litologii, miąższości i położenia w basenie sedymentacyjnym, natomiast dane sejsmiczne o stosunkowo niskiej rozdzielczości nie mogą być w pełni wykorzystane do wiarygodnego zdefiniowania tych sekwencji, gdyż w obrębie jednego refleksu sejsmicznego może zmieścić się nawet kilka „zdarzeń sejsmicznych” (Zeng, 2018; Łaba-Biel i in., 2022). Co więcej, z uwagi na dynamiczną zmienność facjalną utworów miocenu 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.



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

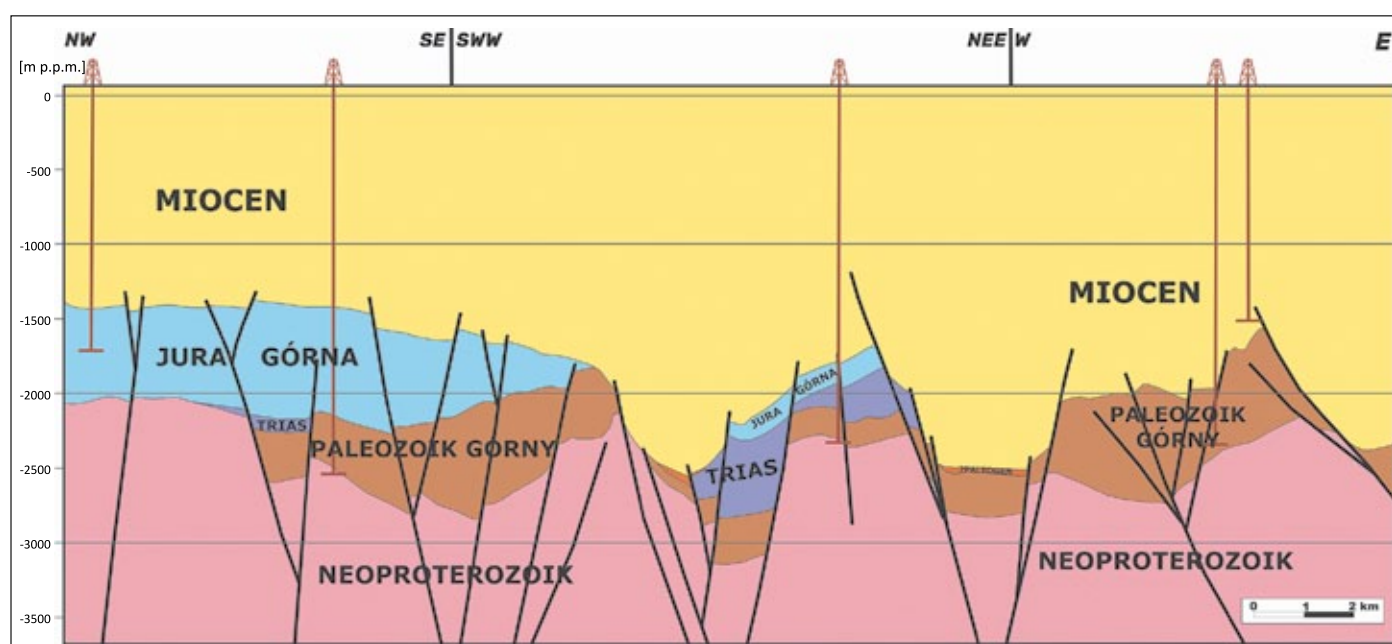
Figure 1. Location of the study area against the range of the Carpathian Foredeep in Poland; ranges of geological units according to Porębski and Warchoła (2006)

Zarys budowy geologicznej rejonu badań

Obszar badań usytuowany jest w centralnej części zapadliska przedkarpackiego (rysunek 1), a w odniesieniu do najstarszych pięter strukturalnych – na obszarze bloku małopolskiego.

Najniższe piętro strukturalne w obszarze badań stanowi seria anchimetamorficznych skał neoproterozoiku, związanych genetycznie z blokiem małopolskim (Buła i in., 2008; Żelaźniewicz i in., 2009) (rysunek 2). Seria ta reprezentowana jest przez

sekwencję skał klastycznych (iłowce i mułowce szare, szaro-zielone i wiśniowe), silnie zdiagenezowanych i w niewielkim stopniu przeobrażonych procesami metamorfizmu regionalnego (Kowalska, 2012). Badania biostratygraficzne wykonane na próbkach rdzeni z kilkudziesięciu otworów z obszaru przedgórzia i podłoża Karpat dokumentują późnoediakarski wiek opisywanego kompleksu (Moryc i Jachowicz, 2000; Jachowicz-Zdanowska, 2011). W obszarze badań utwory neoproterozoiku nawiercono w kilkunastu otworach wiertniczych.



Rysunek 2. Zgeneralizowany przekrój geologiczny przez obszar badań (lokalizację przedstawiono na rysunku 3)

Figure 2. Generalized geological cross-section through the study area (the location is shown in Figure 3)

Utwory paleozoiku reprezentowane są głównie przez dewon i karbon, a jedynie w skrajnie SE części obszaru występują również utwory ordowiku i syluru (Buła i Habryn, 2008). Utwory dewonu reprezentowane są przez ilasto-piaszczyste osady dewonu dolnego pochodzenia lądowego o niewielkich miąższościach (rzędu kilku metrów) oraz głównie węglanowy kompleks środkowego–górnego dewonu. Utwory karbonu dolnego przedgórza Karpat tradycyjnie dzielone są na trzy główne kompleksy litostratygraficzne: klastyczno-węglanowy, węglanowy i klastyczny (*vide* Moryc, 1992, 1996; Jawor i Baran, 2004), przy czym w analizowanym rejonie najszerzej rozprzestrzeniony jest kompleks węglanowy.

Utwory triasu w obszarze badań występują lokalnie, głównie w jego zachodniej części, wypełniając obniżenia w morfologii powierzchni stropowej paleozoiku. Są one głównie reprezentowane przez utwory klastyczne zaliczane tradycyjnie do kompleksu litostratygraficznego pstrego piaskowca dolnego i środkowego (Głowacki i Senkowiczowa, 1969; Moryc, 1971; Szyperko-Teller i Moryc, 1988). Lokalnie w nadkładzie występują również osady marglisto-wapienne, z wtrąceniami skał siarczanowych, zaliczane do retu (górnego pstrego piaskowca) i wapienia muszlowego (Urbaniec i in., 2013, 2020; Moryc, 2014).

Zalegające na różnych stratygraficznie ogniwach (od neoproterozoiku po środkowy trias) utwory jury środkowej reprezentowane są głównie przez osady klastyczne, a jedynie w najwyższym keloweju występują wapienie margliste i zapiaszczone (Moryc, 2006, 2018). Profil jury górnej rozpoczyna stosunkowo jednolity litologicznie kompleks pelitycznych osadów wapienno-marglistych, dobrze udokumentowanych mikrofaunistycznie, określane jako seria gąbkowo-globuligerinowa (Gutowski i in., 2007). Wyżej w profilu utworów jury górnej występuje silnie zróżnicowana facjalnie i litologicznie seria osadów wapiennych, dolomitycznych i marglistych o bardzo dużej miąższości, rzędu kilkuset metrów, w której obrębie można tutaj wyróżnić trzy podstawowe ogniw: biohermowe, detrytycznych wapieni gąbkowych oraz marglisto-wapienne (Gutowski i in., 2007; Urbaniec, 2021). Kolejne ogniwo stanowi seria koralowcowo-onkolitowa, zawierająca liczne pokruszone i zabradowane fragmenty makrofauny. Lokalnie pojawiają się także przewarstwienia wapieni detrytycznych o znacznym udziale oolitów (Złonkiewicz, 2006, 2009). Kolejnym ogniwem litostratygraficznym są płytkowodne osady węglanowe zaliczane do serii muszlowcowo-oolitowej dolnej, z charakterystycznymi przewarstwieniami wapieni organodetrytycznych, oolitowych, onkolitowych oraz warstwami muszlowców ostrzygowych. Utwory jury górnej w obszarze badań zostały rozpoznane wieloma otworami, zwłaszcza w północnej i zachodniej części obszaru. Z kolei w części wschodniej obszaru badań utwory jury zostały całkowicie usunięte przez procesy erozji (rysunek 2).

Na zdecydowanej większości obszaru badań brak jest utworów kredy, które zostały tutaj całkowicie wyerodowane – z wyjątkiem skrajnie NW części.

Utwory paleogenu występują w SE części rejonu badań, a ich zasięg w kierunku N i NW nie jest dobrze rozpoznany, można jednak przypuszczać, że wypełniają one największe obniżenia podłoża, a więc głównie osiowe partie paleodolin. Zostały one rozpoznane w kilku otworach usytuowanych na SE od obszaru badań. Utwory terygeniczne datowane na paleogen opisane zostały przez Moryca (1995) w rejonie Sędziszowa Małopolskiego–Rzeszowa; wydzielił on w ich obrębie dwa kompleksy litostratygraficzne: formację zlepieńców z Raclawówki oraz formację mułowcowo-piaskowcową z Czudca.

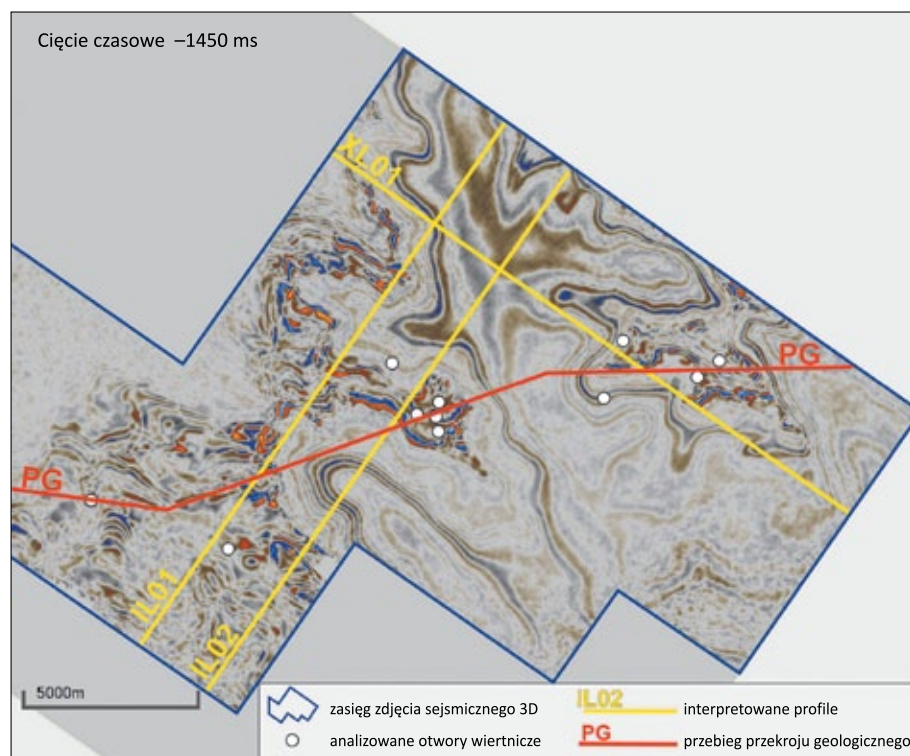
Kompleks utworów miocenu autochtonicznego podzielić można na trzy zasadnicze jednostki litostratygraficzne: klastyczną serię podewaporatową, serię ewaporatową badenu górnego oraz serię utworów klastycznych badenu górnego i sarmatu. Utwory serii podewaporatowej badenu reprezentowane są głównie przez pakiet skał ilastych i mułowców należących do formacji skawińskiej, o miąższości rzędu od kilkunastu do kilkudziesięciu metrów. W części wschodniej obszaru warstwy skawińskie zastępowane są przez piaskowce baranowskie, wykształcone głównie jako piaskowce i piaski kwarcowe z wkładkami mułowców i iłowców. Ogniwo to włączone jest w obręb formacji z Pińczowa (Alexandrowicz i in., 1982). Należy podkreślić, że granice obu wspomnianych wydzieleni litostratygraficznych (tj. formacji skawińskiej i warstw baranowskich) nie zostały jednoznacznie sprecyzowane, w związku z tym w obszarach, gdzie mogą się one zazębiać, istnieją spore trudności z ich rozróżnieniem. Wiek utworów formacji skawińskiej na podstawie badań nanoplanktonu wapiennego określono na wczesny baden, a jej najwyższej części nawet na wczesny serrawal (późny baden) (Andreyeva-Grigorovich i in., 1999, 2003). Wyżej w profilu utworów miocenu występuje seria ewaporatowa badenu, która w obszarze badań reprezentowana jest przez utwory siarczanowe (anhydryty) wydzielane jako formacja z Krzyżanowic (Alexandrowicz i in., 1982; Olszewska, 1999). Zróżnicowany pod względem litologicznym i facjalnym kompleks utworów silikoklastycznych zalegających powyżej serii ewaporatowej w całości zaliczany jest do formacji z Machowa (Alexandrowicz i in., 1982). Formacja ta charakteryzuje się znaczną niejednorodnością litologiczną, a zaliczane do niej utwory to seria osadów iłowcowo-mułowcowo-piaszczystych, występujących w profilu w różnych proporcjach i cechujących się dość dużym zróżnicowaniem facjalnym.

Najmłodszym ogniwem stratygraficznym są utwory czwartorzędu, tworzące luźną pokrywę o niewielkiej miąższości, najczęściej rzędu kilku metrów.

Charakterystyka danych i metodyka interpretacji

Dane sejsmiczne

Do badań wykorzystano zdjęcie sejsmiczne 3D z obszaru centralnej części zapadliska przedkarpackiego o powierzchni około 350 km², które w roku 2016 zostało ponownie przetworzone w Geofizyce Toruń SA (rysunek 3). Podstawową wersją do interpretacji był wolumen sejsmiczny migracji czasowej przed składaniem. Generalnie obraz sejsmiczny w obrębie kompleksów utworów miocenu oraz mezo-paleozoiku uznać można za dobry. Refleksy sejsmiczne w obrębie tych kompleksów w zdecydowanej większości cechują się dużą ciągłością oraz zróżnicowaną dynamiką zapisu, odzwierciedlającą faktyczne relacje amplitudowe. Stosunkowo dobra jakość danych pozwoliła na przeprowadzenie szczegółowej analizy i interpretacji paleośrodowiska sedimentacji oraz interpretacji tektonicznej dla utworów miocenu i ich podłoża.



Rysunek 3. Lokalizacja interpretowanych profili sejsmicznych na tle cięcia czasowego -1450 ms

Figure 3. Location of interpreted seismic sections against the -1450 ms time slice

Metodyka obliczania horyzontów równoczesowych

Sejsmiczna interpretacja obrazu chronostratygraficznego i diagramu Wheelera to narzędzia interpretacyjne pozwalające na zrozumienie i wiarygodną, szczegółową rekonstrukcję architektury depozycyjnej basenu sedimentacyjnego. W celu odtworzenia obrazu chronostratygraficznego cały trójwymiarowy wolumen sejsmiczny poddawany jest post-processingowi z wykorzystaniem procedury identyfikacji

upadów sejsmicznych w module Horizon Cube, stanowiącym podstawę systemu interpretacji sekwencji stratygraficznych w oprogramowaniu OpendTect. W początkowym etapie prac istotnym elementem prac interpretacyjnych jest wytypowanie przekroju do interpretacji na podstawie dokładnej analizy i selekcji sekcji sejsmicznych z interpretowanego zdjęcia 3D. Azymut linii wytypowanych do interpretacji powinien być zgodny z głównymi kierunkami depozycji analizowanych serii osadowych oraz odzwierciedlać zależności geometryczne występujące w basenie sedimentacyjnym (Łaba-Biel i in., 2020). 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 i in., 2007; de Groot i in., 2010). Bramka do obliczeń powinna obejmować większy

zakres czasowy niż interwał, który ma być objęty interpretacją, ponieważ pozwala to na uniknięcie błędów interpretacyjnych podczas korelacji, zwłaszcza w obszarach nierozpoznanych wierceniach. Po wydzieleniu horyzontów równoczesowych transformowane są one do tzw. domeny Wheelera, gdzie przedstawione są w postaci diagramu Wheelera. Diagram ten to stratygraficzny wykres, na którym czas geologiczny jest wykreślony jako skala pionowa, a odległość wzdłuż wybranego profilu to skala pozioma i na którym zebrane są różnego typu informacje stratygraficzne (Wheeler, 1958, 1964; Mitchum, 1977). Tym samym transformacja do domeny Wheelera polega na rozprostowaniu horyzontów równoczesowych i przypisaniu ich do względnej geologicznej skali czasu (Ligtenberg i in., 2006; de Bruin i in., 2007). Diagram wykorzystywany jest w celu identyfikacji i wizualizacji epizodów sedimentacyjnych, lateralnych zasięgów jednostek litostratygraficznych, hiatusów (zdarzeń erozyjnych lub okresów

braku depozycji) oraz kierunków transportu materiału (*vide* Ligtenberg i in., 2006; Qayyum i in., 2012). Zakłada się, że każdy refleks w obrazie sejsmicznym związany jest z konkretną pozycją w sekwencji depozycyjnej, a każdy horyzont chronostratygraficzny – z konkretnym wydarzeniem sedimentacyjnym w interpretowanym basenie, związanym z wahaniami względnego poziomu morza (WPM). Zastosowana metodyka stratygrafii sekwencji opiera się na śledzeniu ważniejszych

granic sekwencyjnych, takich jak granice sekwencji (SB1 oraz SB2) oraz powierzchnie maksymalnego zalewu (msf). Zdefiniowanie najważniejszych relacji geometrycznych w obrębie interpretowanych utworów miocenu na podstawie obrazu chronostratygraficznego i diagramu Wheelera pozwala wyinterpretować ciągi systemów depozycyjnych względnego poziomu morza (WPM), odzwierciedlające zmienność warunków paleośrodowiska. Modele rozwoju sekwencji depozycyjnych, wraz z klasycznymi schematami rozwoju i przekrojami przez różnego typu środowiska sedymentacyjne, przedstawione zostały m.in. w pracach Neala i in., (1993), Catuneanu (2006), Catuneanu i in., (2011), Zecchina i Catuneanu (2017).

Wyniki interpretacji sejsmostratygraficznej

W celu odtworzenia szczegółów dotyczących budowy strukturalnej przykrawędziowych stref paleodolin obliczono horyzonty równoczesowe oraz diagram Wheelera dla trzech przekrojów sejsmicznych, z których dwa (nazwane umownie IL01 i IL02) mają kierunki przebiegu SW-NE, a trzeci (nazwany XL01) – NW-SE (rysunek 3). Interpretacją objęto interwał czasowy, którego granice wyznaczały cięcia czasowe –2250 ms oraz –600 ms. Zastosowanie tak szerokiej bramki interpretacyjnej umożliwiło zdefiniowanie relacji facjalnych i tektonicznych pomiędzy silnie zaangażowanymi tektonicznie utworami podłoża a zalegającymi powyżej utworami miocenu autochtonicznego. Rozkład kolorystyczny w obliczonym obrazie równoczesowym i diagramie Wheelera ukazuje względne relacje czasowe odzwierciedlające wszystkie zachowane do dziś sekwencje osadowe w całym profilu geologicznym, od neoproterozoiku do miocenu (rysunek 4), z licznymi lukami stratygraficznymi, zwłaszcza w profilu paleozoiku i mezozoiku. Uzyskany w wyniku działania zastosowanych procedur obliczeniowych rozkład kolorów pozytywnie weryfikuje poprawność otrzymanego modelu oraz dobrze koresponduje z regionalną wiedzą geologiczną dotyczącą czasu depozycji poszczególnych serii osadowych. Na diagramie Wheelera niższa część profilu geologicznego, odpowiadająca utworom neoproterozoicznemu, paleozoicznemu i mezozoicznemu, manifestuje się największym zróżnicowaniem kolorystycznym oraz licznie występującymi lukami stratygraficznymi, co odpowiada faktycznie długiemu okresowi deponowania tych serii osadowych oraz licznym epizodom erozyjnym, jakie występowały w długiej historii tego rejonu (rysunek 4). Natomiast prawie całej, znacznie bardziej miększej serii osadów miocenu został w modelu przypisany w zasadzie jeden kolor – granatowy (rysunek 4), co z kolei świadczy o tym, że utwory te ujęte zostały w jeden duży epizod sedymentacyjny, który jednak w skali względnego czasu geologicznego nie trwał aż tak długo.

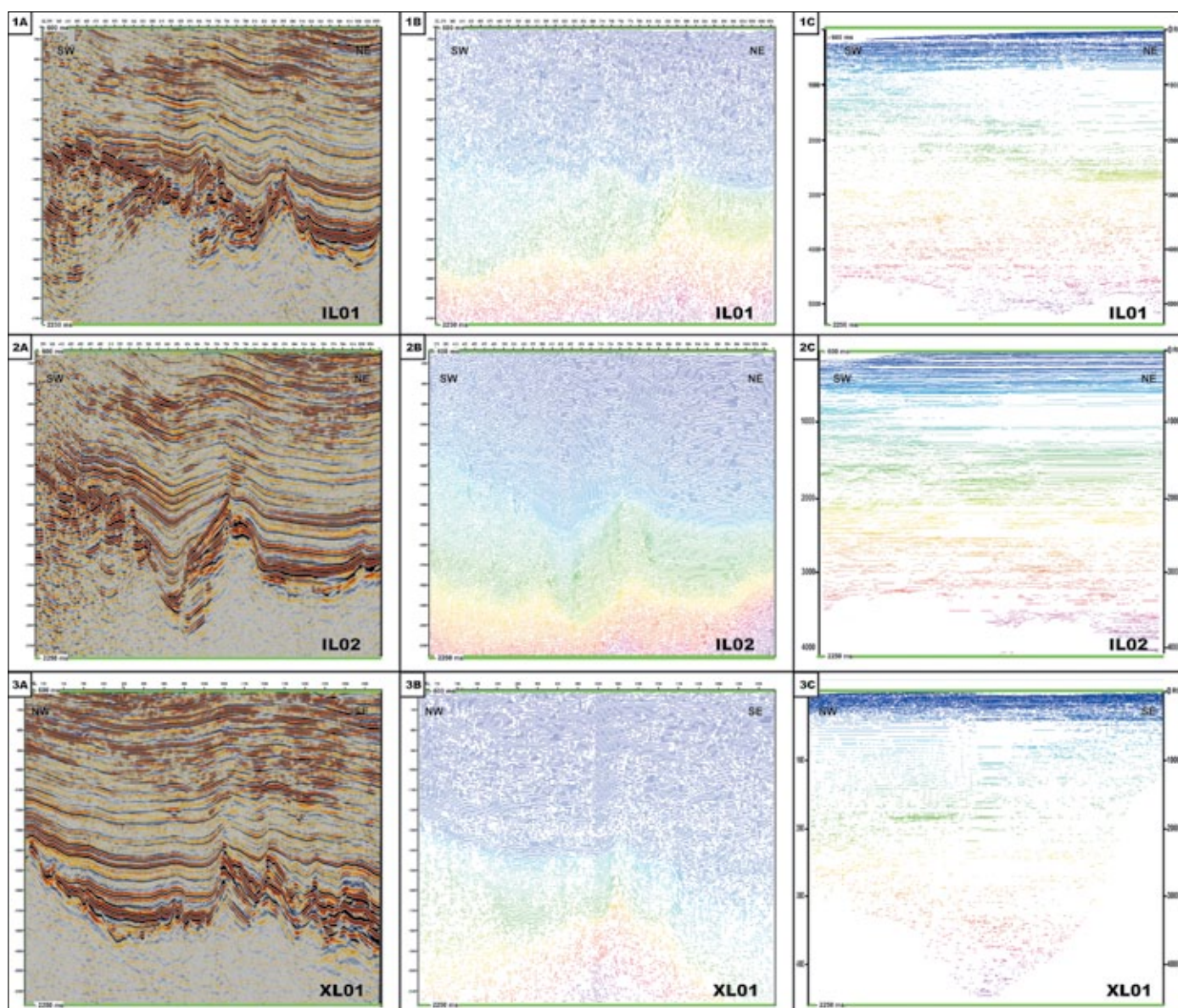
W całym interwale objętym interpretacją przeprowadzono analizę konfiguracji, ciągłości oraz kontaktów horyzontów równoczesowych. Śledzenie ciągłości horyzontów chronostratygraficznych stanowiło podstawę do rozpoznania historii tektonicznej analizowanych utworów (*vide* Watkinson i in., 2007; Haqique i in., 2018). Przeprowadzona analiza następstwa chronologicznego kolejnych pakietów horyzontów równoczesowych, z jednoczesną interpretacją powierzchni dyslokacji, pozwoliła na podzielenie interpretowanego interwału na odrębne jednostki strukturalne, które w generalnym ujęciu odpowiadają jednostkom tektonostratygraficznym.

Wyniki interpretacji utworów starszych pięter strukturalnych (neoproterozoicznego i mezo-paleozoicznego) przy wykorzystaniu opisywanej metody wydają się bardzo obiecujące, zwłaszcza w kontekście odtworzenia budowy strukturalnej tych formacji. Pomimo pozornie niejednoznacznego zapisu w obrazie horyzontów równoczesowych na diagramie Wheelera, jaki obserwować można w interwałach odpowiadających utworom podłoża miocenu, przeprowadzona interpretacja wykazała, że istniejące następstwo hierarchiczne w zapisie tych horyzontów logicznie koresponduje z obrazem strukturalnym horyzontów równoczesowych. Trudny do interpretacji zapis w omawianej strefie jest najprawdopodobniej wynikiem bardzo dużego zaangażowania tektonicznego formacji skalnych budujących to podłoże.

W obrazie analizowanych horyzontów chronostratygraficznych widoczne są wyraźne powierzchnie nieciągłości, które interpretować można jako powierzchnie uskokowe (oznaczone czarnymi przerywanymi liniami na rysunku 5). Warto podkreślić, że zdecydowana większość tych powierzchni ma charakter lokalny. Co więcej, często nie są one widoczne w standardowym obrazie sejsmicznym.

Wyniki przeprowadzonej interpretacji wskazują, że w obrębie utworów starszych od kenozoiku wyróżnić można szereg jednostek strukturalnych o zróżnicowanym charakterze tektonicznym (rysunek 5). Każdy z tych elementów cechuje się odmiennym obrazem w zapisie chronostratygraficznym, specyficznym układem horyzontów równoczesowych, jak również systemem uskoków.

Niższa część utworów neoproterozoicznych (kolory od ciemnozielonego do brunatnego na rysunku 5) zbudowana jest z bardzo licznych drobnych bloków tektonicznych o dużym stopniu dezintegracji, które generalnie tworzą element o kształcie zbliżonym do kopuły (rysunek 5). Obecne w tej strefie liczne fragmenty podłoża, w których obrębie brak jest jakiegokolwiek zapisu horyzontów równoczesowych (zaznaczone jako białe elementy na rysunku 5), interpretować można jako niewielkie bloki skalne o tak dużym stopniu dezintegracji, że program nie był w stanie w ich obrębie prawidłowo zdefiniować upadów warstw. Ponadto można zaobserwować, że niektóre bloki



Rysunek 4. Zestawienie analizowanych profili sejsmicznych IL01, IL02 oraz XL01 (lokalizacja na rysunku 3): A) w standardowej wersji migracji czasowej, B) w wersji z obliczonymi horyzontami równoczasowymi w skali barwnej odpowiadającej względnej skali czasu – od najstarszych (kolor fioletowy) do najmłodszych (kolor granatowy), C) w wersji diagramu Wheelera

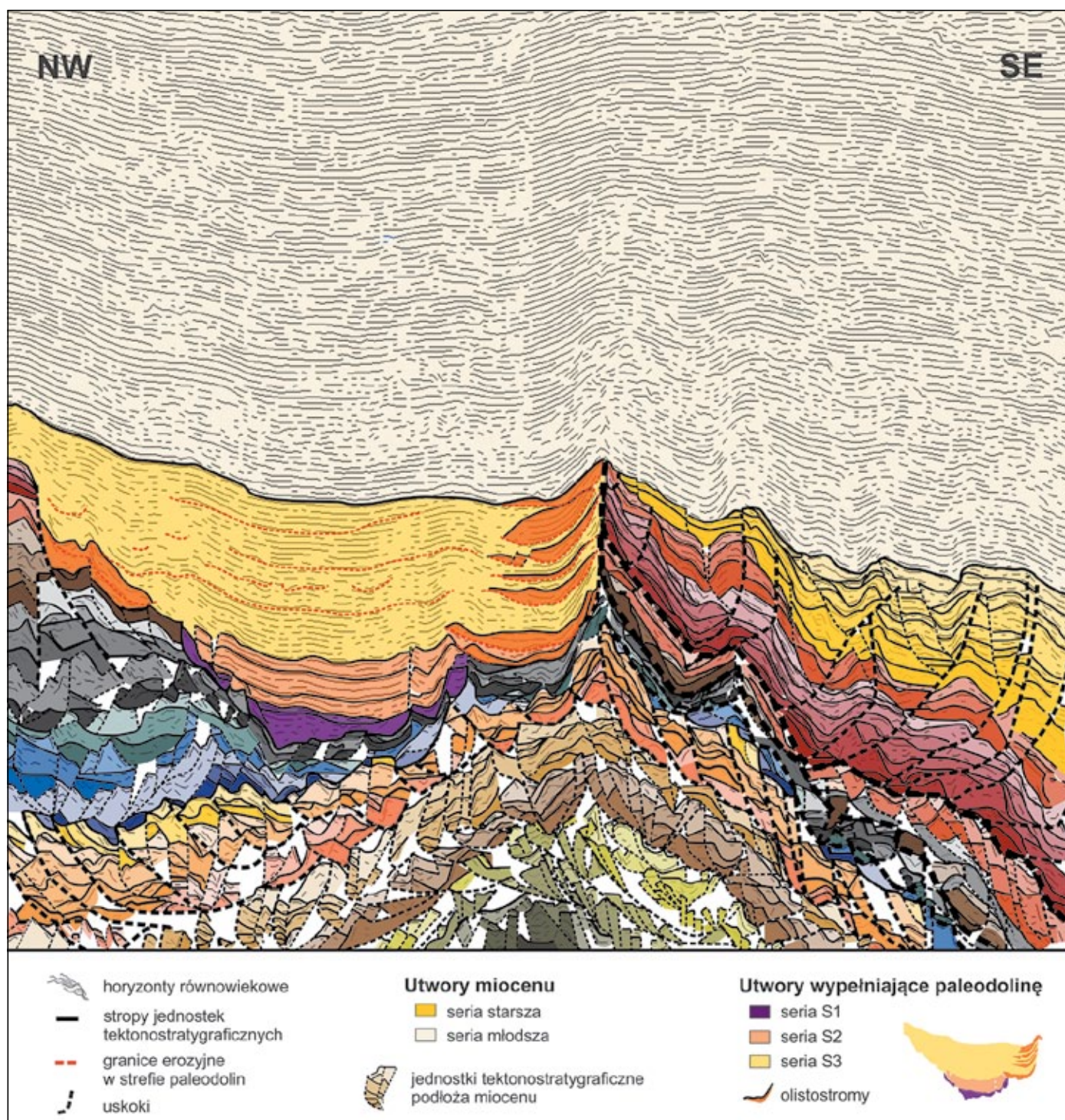
Figure 4. Compilation of the analysed seismic sections IL01, IL02, and XL01 (location shown in Figure 3): A) conventional version of the seismic time migration, B) version with calculated chronostratigraphic horizons in a colour scale corresponding to the relative time scale – from the oldest (violet) to the youngest (dark blue), C) Wheeler diagram transformation

przemieszczone zostały ku górze, tworząc generalnie stromo nachyloną powierzchnię stropową całego kompleksu, stanowiącą podstawę do rozwoju powierzchni uskokuwej, wzdłuż której następnie dochodziło do grawitacyjnego zsuwania się nadległych pakietów skał neoproterozoicznych.

W wyższej części profilu neoproterozoiku (kolory od brzo-skwinowego do beżowego na rysunku 5) w interpretowanej strefie prześledzono z kolei obecność licznych uskoków o charakterze listrycznym. Geometria tych uskoków może świadczyć zarówno o ekstensyjnej fazie tektonicznej, jak też o intensywnej rotacji całego bloku zbudowanego z utworów neoproterozoicznych. Ponadto w stropach poszczególnych

jednostek tektonicznych wyinterpretować można niezgodności kątowe i najprawdopodobniej związane z tym ścięcia erozyjne najwyższych części sekwencji. Analiza układu horyzontów równoczasowych, połączona z interpretacją głównych stref uskokuwych, wykazała, że granice pomiędzy kolejnymi jednostkami tektonicznymi w wielu przypadkach interpretować można jako powierzchni połączonych uskoku, opartych na sztywnych, zrotowanych blokach budujących niższe jednostki tektoniczne.

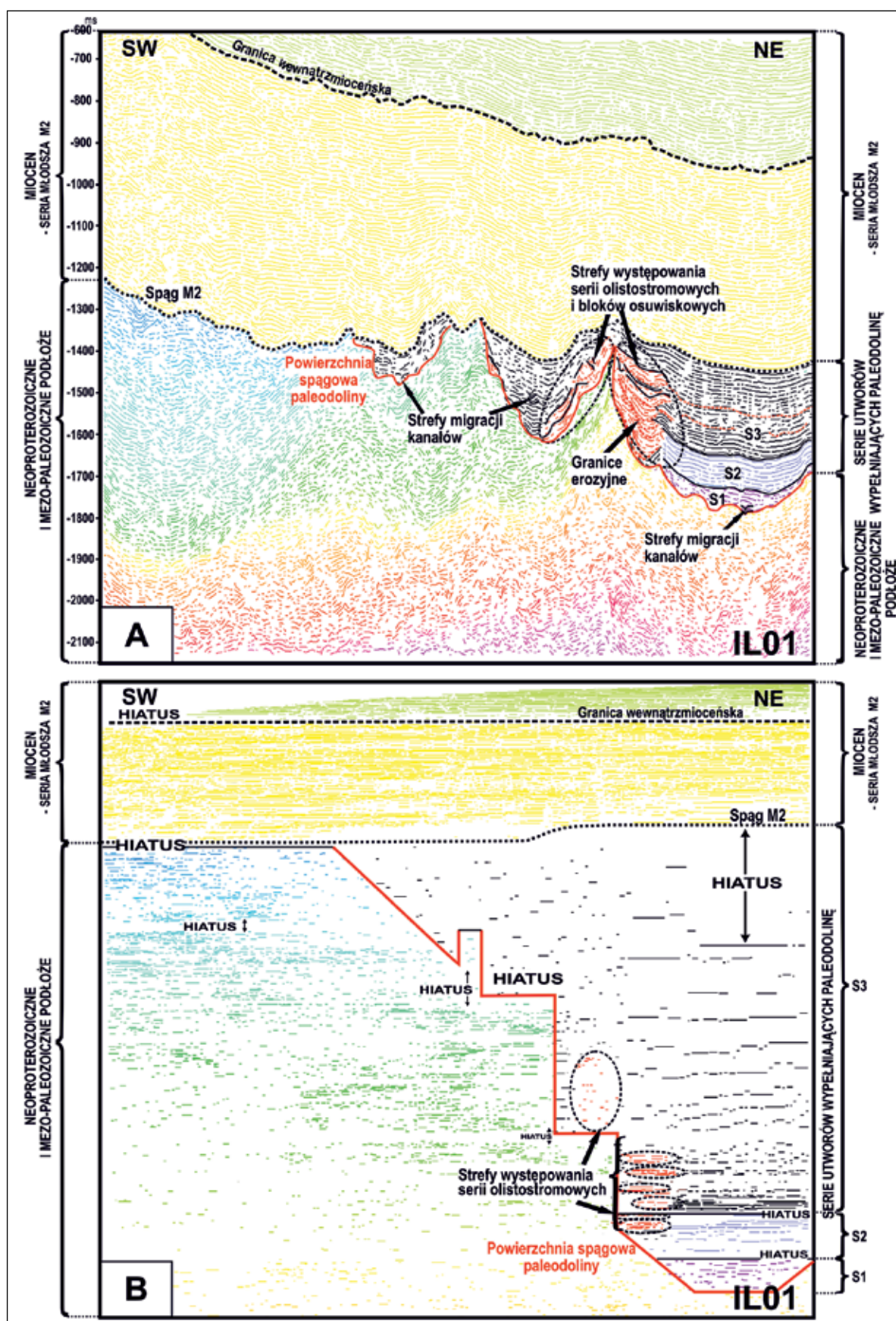
W interwałach odpowiadających utworom młodszego paleozoiku (tj. dewonu i karbonu, które udokumentowane zostały w profilach kilku głębokich otworów wiertniczych



Rysunek 5. Interpretacja tektonostratygiczna obrazu chronostratygicznego na profilu sejsmicznym XL01 (lokalizacja na rysunku 3)
Figure 5. Tectonostratigraphic interpretation of the chronostratigraphic image on seismic section XL01 (location in Figure 3)

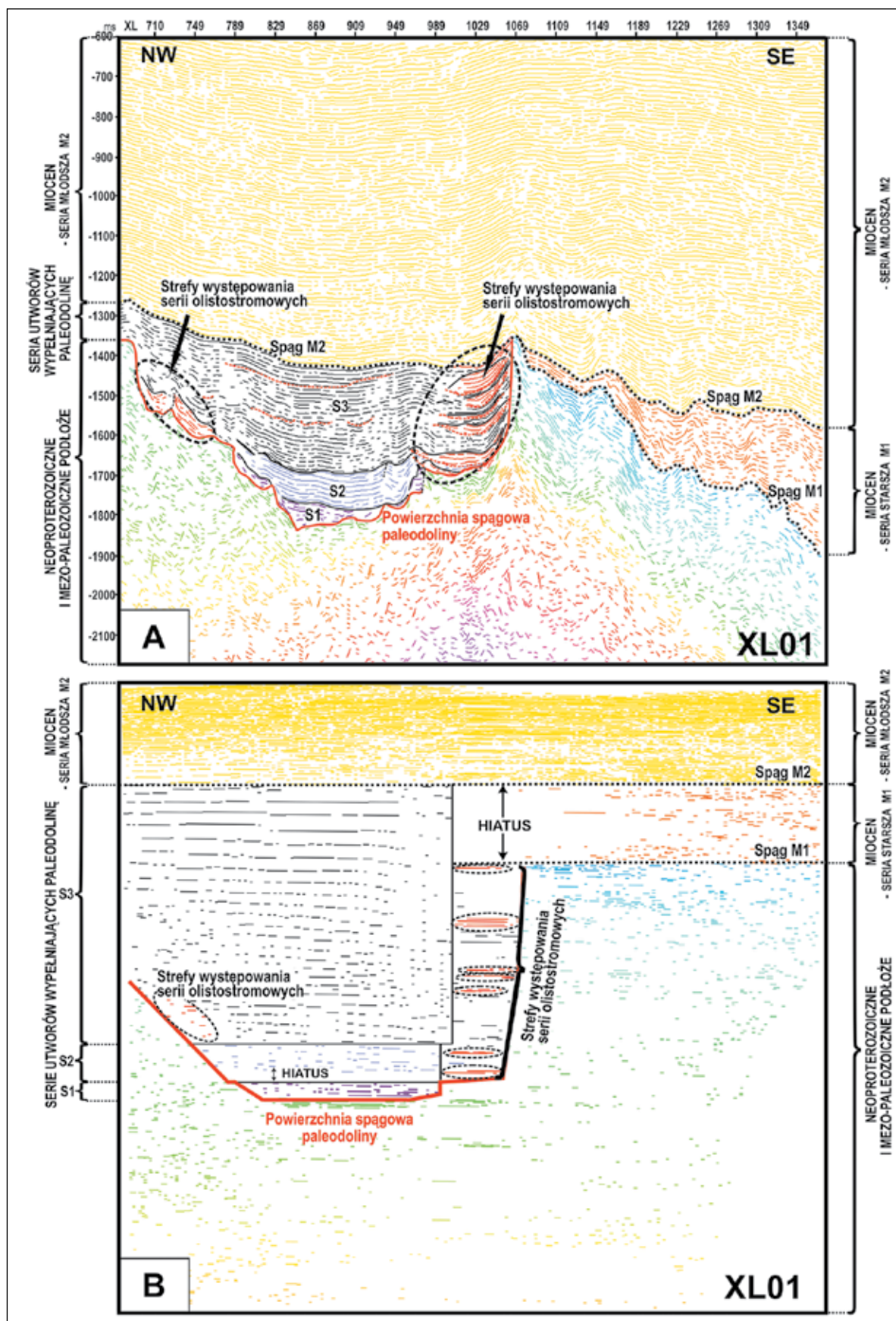
zlokalizowanych w tym rejonie) odnotowano występowanie licznych stref dyslokacyjnych, dzielących cały kompleks na stosunkowo niewielkie segmenty o charakterze zrębów i rowów tektonicznych. Efekt ten szczególnie dobrze manifestuje się w zapisie chronostratygicznym w NW części analizowanego profilu XL01 (bloki skalne w kolorze szarym na rysunku 5). Z kolei w części SE tego profilu wyinterpretowano obecność licznych uskokuw listrycznych (kompleks w kolorze szarym),

związanych najprawdopodobniej z grawitacyjnym zapadaniem się w kierunku SE stromej krawędzi platformy zbudowanej z utworów neoproterozoicznych. Powyżej tej strefy wyinterpretowano system uskokuw brzeżnych, charakteryzujących się występowaniem głównego wysokokątowego uskoku wraz licznie odchodzącymi od niego uskokuami typu odgałęzienia (ang. *branch faults*), pomiędzy którymi występują antykliny o krótkich osiach zanurzania.



Rysunek 6. Interpretacja seismostratygraficzna utworów wypełniających paleodolinę na profilu IL01: A) na tle obrazu chronostratygraficznego, B) na diagramie Wheelera

Figure 6. Seismostratigraphic interpretation of the palaeovalley filling formations on section IL01: A) in the background of chronostratigraphic image, B) on the Wheeler diagram



Rysunek 7. Interpretacja sejsmostratygryczna utworów wypełniających paleodolinę na profilu XL01: A) na tle obrazu chronostratygrycznego, B) na diagramie Wheelera

Figure 7. Seismostratigraphic interpretation of the palaeovalley filling formations on section XL01: A) in the background of chronostratigraphic image, B) on the Wheeler diagram

Interpretacja diagramu Wheelera na wybranych przekrojach wykazała obecność szeregu luk stratygraficznych o zróżnicowanym charakterze i lokalnym lub regionalnym rozprzestrzenieniu (rysunki 4, 6 i 7). Ujawnione w procesie interpretacji luki stratygraficzne mogą być zarówno wynikiem erozji zdeponowanych wcześniej osadów, jak też mogą odpowiadać okresom braku sedymentacji. Duża liczba luk stratygraficznych świadczy o znacznej różnorodności procesów depozycji i erozji zachodzących w obrębie analizowanego basenu, wynikającej przede wszystkim ze zmieniających się w czasie warunków sedymentacji, kierunków dostawy materiału osadowego, a także najprawdopodobniej z aktywności tektonicznej obszaru.

W wyższej części analizowanego profilu występują bardzo charakterystyczne elementy architektury strukturalnej, jakimi są paleodoliny, głęboko wcinające się w utwory podłoża mezo-paleozoicznego (rysunki 2 i 5). Paleodoliny te zostały wypełnione utworami wieku paleogeńskiego, a następnie neogeńskiego, w wyniku złożonych i wzajemnie na siebie oddziałujących procesów depozycyjnych i tektonicznych (Połtowicz, 1998a, 1998b; Krzywiec i in., 2008).

Warto podkreślić, że znaczną trudność w interpretacji przykrawędziowych stref paleodolin stanowi niejednoznaczny przebieg granicy pomiędzy starszym (mezo-paleozoicznym) podłożem a utworami wypełniającymi paleodolinę. Problem precyzyjnego wyznaczenia granic tego typu elementów wynika z faktu, że bezpośrednio do stromych krawędzi paleodolin przylegają osunięte bloki skalne (olistolity), niekiedy o znacznych rozmiarach, które zostały przemieszczone na stosunkowo niewielkim dystansie, bądź też utwory olistostromowe zbudowane z identycznych litologicznie utworów jak krawędzie paleodoliny (Urbaniec i in., 2021).

Zróżnicowanie facjalne utworów wypełniających paleodoliny często nie znajduje odzwierciedlenia w obrazie sejsmicznym, a co za tym idzie – stosowane dotychczas standardowe metody interpretacji rzadko pozwalają na szczegółowe rozpoznanie i odtworzenie architektury depozycyjnej tych serii osadowych. Ponadto utwory wypełniające paleodoliny mogą być również trudne do interpretacji ze względu na stosunkowo niewielkie miąższości poszczególnych sekwencji depozycyjnych, dużą zmienność facjalną, a także zmienność kierunków dostawy materiału osadowego. Dodatkowo obraz ten komplikuje występowanie licznych dyslokacji oraz deformacji związanych z występowaniem zjawiska ruchów masowych, w tym osuwania się do basenu wspomnianych serii utworów olistostromowych.

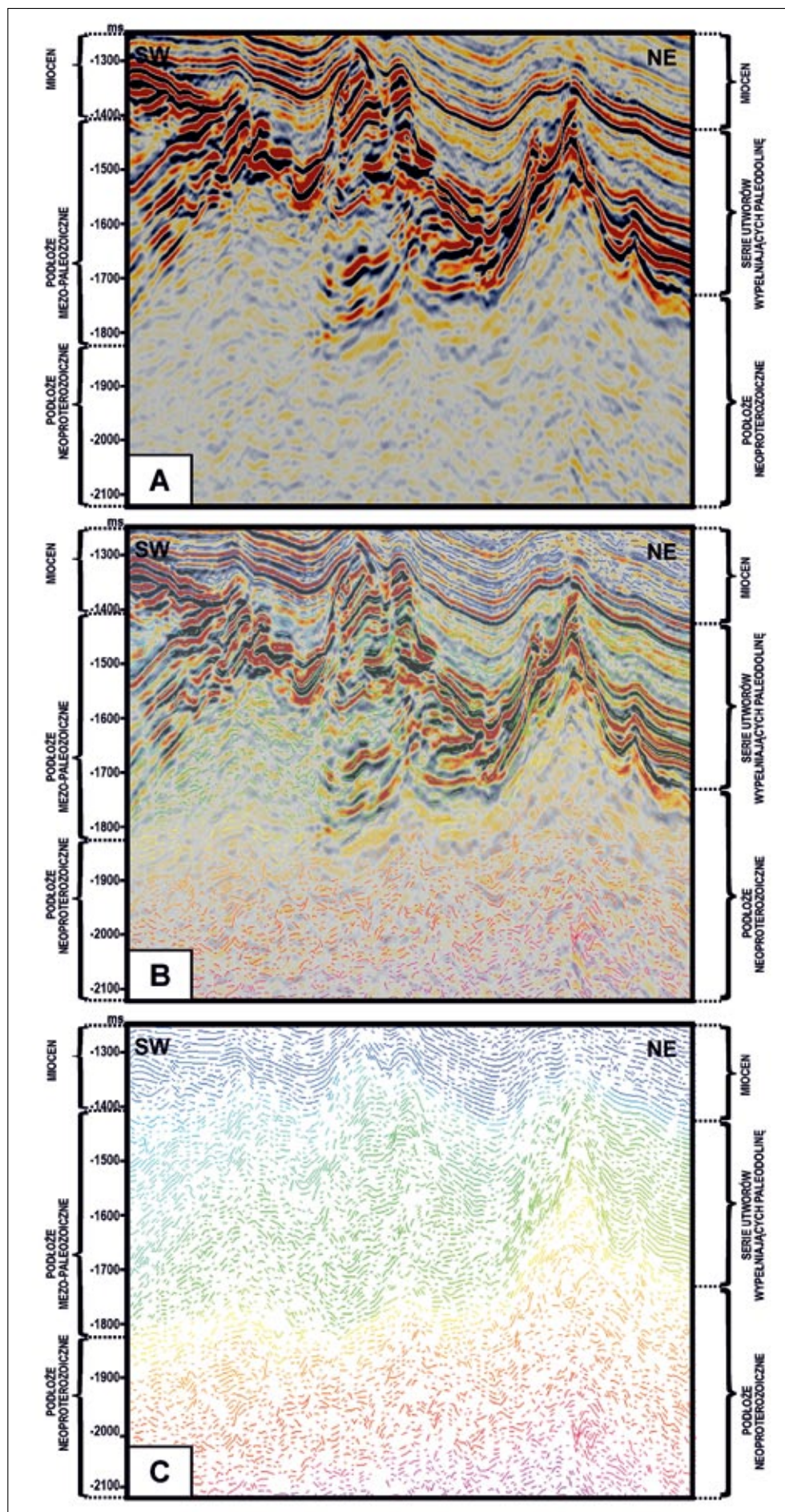
Szczegółowe podejście do interpretacji pozwoliło na odtworzenie V-kształtnej geometrii w spągowej partii analizowanej paleodoliny (rysunek 7), jak również na zidentyfikowanie nie zawsze oczywistej lokalizacji jej krawędzi. W ramach prac interpretacyjnych zidentyfikowano trzy serie różnowiekowych

utworów wypełniających paleodolinę (S1–S3) oraz zdefiniowano granice pomiędzy tymi seriami (rysunki 6 i 7). W stropach wspomnianych serii, charakteryzujących się odmiennym układem horyzontów równoczesowych, odnotowano występowanie wyraźnych luk stratygraficznych. W obrębie najstarszej serii (S1), która może być utożsamiana prawdopodobnie z utworami paleogenu, zidentyfikowano wychylone bloki opierające się o siebie i ściśle przywierające do stromych krawędzi paleorynny. Analiza uzyskanego obrazu chronostratygraficznego w obrębie tej serii pozwoliła również na identyfikację niewielkich systemów kanałowych, głównie o agradacyjnym charakterze migracji koryt (rysunek 6). Ich obecność, zaznaczająca się przede wszystkim w niższej, osiowej strefie analizowanych paleodolin jako V-kształtne erozyjne wcięcia (w tym także w utwory podłoża) (rysunek 7), potwierdza pogląd Połtowicza (1998a, 1998b), że geneza analizowanych paleodolin może być ściśle związana z systemem rzeczny, który w okresie paleogenu odwadniał tzw. łąd małopolski, rozwijając się na jego południowym skłonie.

Seria środkowa (S2) wyraźnie wyróżnia się zapisem wśród utworów zalegających poniżej i powyżej. Uwagę zwraca charakterystyczny klinowy kształt serii, jak również brak wyraźnej granicy erozyjnej w jej spągu. Seria ta wypełnia osiową partię paleodoliny.

Seria utworów najmłodszych (S3) cechuje się dużym zróżnicowaniem zapisu sejsmicznego, co najprawdopodobniej można wiązać ze zmiennością kierunków dostawy materiału osadowego do basenu sedymentacyjnego oraz z lateralną i wertykalną migracją stosunkowo niewielkich kanałów, możliwych do identyfikacji w centralnej części paleodoliny (rysunek 6). Należy zwrócić uwagę, że utwory facji kanałowych często mogą przejawiać się subtelnymi zmianami litologicznymi (Batson i Gibling, 2002; Blum i in., 2013; Li i in., 2017), w wyniku czego obraz równoczesowy w odtworzeniu diagramu Wheelera może być trudny i niejednoznaczny do interpretacji. Ponadto w obrębie opisywanej serii, w pobliżu stromej południowo-wschodniej krawędzi paleodoliny, w obrazie chronostratygraficznym zidentyfikowano zapisy charakterystyczne dla utworów olistostromowych. U czoła serii olistostromowych często widoczne są miejsca cechujące się brakiem zapisu oraz niewielkie wybrzuszenia (rysunki 6 i 7), które można interpretować jako strefy deformacji utworów miocenu powstałych w wyniku transportu dużej masy osadów.

Przeprowadzona interpretacja wskazuje na obecność w południowo-wschodniej części obszaru badań serii osadów mioceńskich (opisanych jako starsza seria miocenu – M1 na rysunku 7), zdeponowanych poza strefami paleodolin, która w znacznym stopniu naśladuje konfigurację utworów podłoża paleozoicznego i wykazuje inny układ horyzontów równoczesowych w stosunku do zalegającej powyżej serii młodszej (M2).



Rysunek 8. Zestawienie fragmentu profilu IL01: A) w standardowej wersji migracji czasowej, B) z nałożonymi na sekcję sejsmiczną horyzontami równoczesowymi, C) z horyzontami równoczesowymi w skali barwnej odpowiadającej względnej skali czasu

Figure 8. Compilation of a fragment of section IL01: A) in standard time migration version, B) with chronostratigraphic horizons against the seismic section, C) chronostratigraphic horizons in a colour scale corresponding to the relative time scale

Po etapie stosunkowo szybkiego wypełnienia paleodolin (osady serii S1–S3) oraz depozycji wspomnianej powyżej starszej serii osadowej (M1) doszło do wyrównania reliefu podłoża (granica opisana jako spąg serii M2 na rysunkach 6 i 7), a następnie w omawianym segmencie basenu sedimentacyjnego zapadliska przedkarpackiego nastąpił etap wyraźnego ujednolicenia charakteru sedimentacji i depozycja miększej serii osadowej M2 (rysunki 5–7).

Podsumowanie

Przeprowadzona interpretacja sejsmostratygraficzna utworów miocenu i ich podłoża w strefach paleodolin centralnej części przedgórza Karpat, wykonana na podstawie obliczonych dla wybranych profili sejsmicznych horyzontów chronostratygraficznych, pozwoliła na szczegółowe scharakteryzowanie architektury depozycyjnej rejonu badań oraz zdefiniowanie głównych mechanizmów mających zasadniczy wpływ na obecny obraz strukturalny. Obszar badań charakteryzuje się dużym skomplikowaniem budowy geologicznej, co związane jest z obecnością licznych dyslokacji i zróżnicowanym wykształceniem litofacjalnym utworów budujących poszczególne piętra strukturalne, jak również z obecnością charakterystycznych dla tego rejonu elementów, jakimi są głęboko wcięte paleodoliny.

Przeprowadzona analiza obrazu chronostratygraficznego pozwoliła na uzyskanie wielu szczegółowych informacji na temat budowy strukturalnej utworów mezo-paleozoicznego oraz neoproterozoicznego podłoża. W obrębie tych pięter strukturalnych wyinterpretowano szereg dyslokacji i jednostek tektonicznych, wyraźnie różniących się charakterem i ograniczonych powierzchniami niezgodności kątowych, którym na diagramie Wheelera odpowiadają hiatusy.

W niższej części utworów neoproterozoiku wyinterpretowano liczne zdeintegrowane i przemieszczane względem siebie bloki skalne, które sumarycznie tworzą element strukturalny o geometrii przypominającej kształtem kopułę. Wyżej w profilu prześlędzono liczne uskoki o charakterze listrycznym, świadczące zarówno o ekstensyjnej fazie tektonicznej, jak też o bardzo intensywnej rotacji całego bloku zbudowanego z utworów neoproterozoicznych. W interwałach odpowiadających utworom młodszego paleozoiku odnotowano występowanie dwóch systemów uskokowych. W części północnej obszaru wyinterpretowano system uskoków ograniczających stosunkowo niewielkie segmenty o charakterze zrębów i rowów tektonicznych, natomiast w części południowej zdefiniowano system uskoków listrycznych, związany najprawdopodobniej z grawitacyjnym zapadaniem się w kierunku południowym stromej krawędzi platformy zbudowanej z utworów neoproterozoiku. Natomiast w nadkładzie tego kompleksu rozpoznano system

uskoków brzeżnych z głównym uskokiem wysokokątowym oraz licznie odchodzącymi od niego uskokiemi o charakterze odgałęzień.

Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że metoda sejsmostratygraficzna oparta na interpretacji obrazów chronostratygraficznych pozwala na odtworzenie wielu szczegółów budowy geologicznej silnie zaburzonych tektonicznie utworów mezo-paleozoicznych oraz neoproterozoicznych. Nawet w obrębie kompleksu neoproterozoicznego możliwe było bardzo szczegółowe wyinterpretowanie licznych niewielkich bloków skalnych, wyraźnie zrotowanych względem siebie, podczas gdy na standardowych sekcjach sejsmicznych obraz tego kompleksu jest prawie całkowicie nieczytelny, co prawdopodobnie wynika ze znacznego wytłumienia amplitudowego i braku ciągłości refleksów sejsmicznych w tej strefie (rysunek 8). Metoda ta ma więc duży potencjał interpretacyjny w odniesieniu do tego typu utworów o skomplikowanej i wieloetapowej historii tektonicznej. Większe możliwości interpretacji wynikają w dużej mierze z większej rozdzielczości obrazu chronostratygraficznego w porównaniu z rozdzielczością standardowych wolumenów sejsmicznych, co uzyskuje się w efekcie postprocessingu z wykorzystaniem procedury identyfikacji upadów warstw.

Istotnym elementem budowy strukturalnej w rejonie badań są wyerodowane w utworach podłoża głębokie paleodoliny, wypełnione utworami trzech wyróżniających się serii osadowych (S1–S3), które można utożsamiać z utworami wieku paleogeńskiego i neogeńskiego. Sedymencję w analizowanym rejonie kończą utwory deponowane po etapie wypełnienia paleodolin, przy w miarę wyrównanym paleoreliefie podłoża.

W obrębie najstarszej serii utworów wypełniających paleodoliny (S1) zidentyfikowano niewielkie dyslokacje oraz pojedyncze, zrotowane bloki osuwiskowe, które najprawdopodobniej transportowane były na stosunkowo niewielkie odległości. Bloki te często przylegają do krawędziowych stref paleodolin. W wyższej, znacznie szerszej części paleodolin (serie S2 i S3) stwierdzono obecność seriiolistostromowych wraz z występującymi u ich czoła strefami deformacji. Geneza tego typu elementów związana jest z procesami intensywnej erozji stromych krawędzi paleodolin i zachodzącymi w tych strefach zjawiskami ruchów masowych, w tym zwłaszcza podmorskich spływów grawitacyjnych.

Literatura

- Alexandrowicz S.W., Garlicki A., Rutkowski J., 1982. Podstawowe jednostki litostratygraficzne miocenu zapadliska przedkarpackiego. *Kwartalnik Geologiczny*, 26(2): 470–471.
- Andreyeva-Grigorovich A.S., Oszczypko N., Savitskaya N.A., Ślaczka A., Trofimovich N.A., 2003. Correlation of Late Badenian salts of the Wieliczka, Bochnia and Kalush areas (Polish and Ukrainian Carpathian Foredeep). *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, 73(2): 67–89.

- Andreyeva-Grigorovich A.S., Oszczypko N., Ślęczka A., Savitskaya N.A., Trofimovich N.A., 1999. The age of the Miocene salt deposits of the Wieliczka, Bochnia and Kalush areas (Polish and Ukrainian Carpathian Foredeep). *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 387: 85–86.
- Batson P.A., Gibling M.R., 2002. Architecture of channel bodies and paleovalley fills in high-frequency Carboniferous sequences, Sydney Basin, Atlantic Canada. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 50(1): 138–157. DOI: 10.2113/50.1.138.
- Blum M., Martin J., Milliken K., Garvin M., 2013. Paleovalley systems: Insights from Quaternary analogs and experiments, Earth-Science Reviews, 116(1): 128–169. DOI: 10.1016/j.earscirev.2012.09.003.
- Buła Z., Habryn R. (red.), 2008. Atlas geologiczno-strukturalny paleozoicznego podłoża Karpat zewnętrznych i zapadliska przedkarpackiego; 1:300000. *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., 2006. Principles of Sequence Similarity. *Wydawnictwo Elsevier, Alberta*.
- Catuneanu O., Galloway W.E., Kendall Ch.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.
- De Bruin G., 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.
- De Groot P., Huck A., de Bruin G., Hemstra N., Bedford J., 2010. The Horizon Cube: A step change in seismic interpretation. *The Leading Edge*, 29(9): 1048–1055.
- Deptuck M.E., Mosher D.C., Campbell D.C., Hughes-Clarke J.E., Noseworthy D., 2007. Along slope variations in mass failures and relationships to major Plio-Pleistocene morphological elements, SW Labrador Sea. [W:] Lykousis V., Sakellariou D., Locat J., (eds.). *Submarine Mass Movements 3rd International Symposium*. Springer, Dordrecht. ISBN 978-1-4020-6511-8.
- Dziadzio P., Jachowicz M., 1996. Budowa podłoża utworów miocennych na SW od wyniesienia Lubaczowa. *Przegląd Geologiczny*, 44(11): 1124–1130.
- Głowacki E., Senkowiczowa H., 1969. Uwagi o rozwoju triasu na obszarze południowo-wschodniej Polski. *Kwartalnik Geologiczny*, 13(2): 338–356.
- Gradziński R., 1957. Uwagi o sedymentacji miocenu w okolicy Proszowic. *Rocznik Polskiego Towarzystwa Geologicznego*, 26(1): 3–27.
- Gutowski J., Urbaniec A., Złonkiewicz Z., Bobrek L., Świetlik B., Gliniak P., 2007. Stratygrafia górnej jury i dolnej kredy środkowej części przedpola polskich Karpat. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 426: 1–26.
- Haqiqe 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.
- Jawor E., Baran U., 2004. Budowa geologiczna i charakterystyka utworów karbonu w południowej części bloku małopolskiego. [W:] Kotarba M.J. (red.). *Możliwości generowania węglowodorów w skałach karbonu w południowej części bloku górnośląskiego i małopolskiego*. Wydawnictwo Naukowe „Akapit”, Kraków: 25–48.
- Karnkowski P., Głowacki E., 1961. O budowie geologicznej utworów podmiocennych przedgórza Karpat środkowych. *Kwartalnik Geologiczny*, 5(2): 372–419.
- Karnkowski P.H., Ozimkowski W., 2001. Ewolucja strukturalna podłoża miocennego basenu przedkarpackiego (obszar pomiędzy Krakowem a Przemyślem). *Przegląd Geologiczny*, 49(5): 431–436.
- Kowalska S., 2012. Granica diagenetyzacji/anchimetamorfizmu w skałach najwyższego proterozoiku i kambriu ze wschodniej części bloku małopolskiego wyznaczona na podstawie badań minerałów ilastych. *Prace Naukowe Instytutu Nafty i Gazu*, 187: 1–152.
- Krzywiec P., 2001. Contrasting tectonic and sedimentary history of the central and eastern parts of the Polish Carpathians Foredeep Basin – results of seismic data interpretation. *Marine and Petroleum Geology*, 18: 13–38.
- Krzywiec P., Wysocka A., Oszczypko N., Mastalerz K., Papiernik B., Wróbel G., Oszczypko-Clowes M., Aleksandrowski P., Madej K., Kijewska S., 2008. Ewolucja utworów miocennych zapadliska przedkarpackiego w rejonie Rzeszowa (obszar zdjęcia sejsmicznego 3D Sokołów–Smolarzyny). *Przegląd Geologiczny*, 56(3): 232–244.
- Li Q., Yu S., Wu W., Tong L., Kang H., 2017. Detection of a deep-water channel in 3D seismic data using the sweetness attribute and seismic geomorphology: a case study from the Taranaki Basin, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 60(3): 199–208. DOI: 10.1080/00288306.2017.1307230.
- Ligtenberg H., de Bruin G., Hemstra N., Geel C.R., 2006. Sequence Stratigraphic Interpretation in the Wheeler Transformed (Flattened) Seismic Domain. *68th European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2006, European Association of Geoscientists & Engineers*, 3: 1622–1626. DOI: 10.3997/2214-4609.201402337.
- 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., Urbaniec A., Filipowska-Jeziorek K., 2022. Przykład interpretacji sejsmostratygraficznej i tektonostratygraficznej utworów miocenu z obszaru centralnej części zapadliska przedkarpackiego. *Nafta-Gaz*, 78(8): 565–579. DOI: 10.18668/NG.2022.08.01.
- Łapinkiewicz A., Karpala A., 1967. Morfologia podłoża miocenu zachodniej części zapadliska przedkarpackiego na podstawie badań sejsmicznych. *Geofizyka i Geologia Naftowa*, 6–7: 205–213.
- Mitchum Jr. R.M., 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level. Part 11: glossary of terms used in seismic stratigraphy. [W:] Payton C.E. (ed.). *Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon Exploration. AAPG Memoir*, 26: 205–212.
- Moryc W., 1971. Trias przedgórza Karpat środkowych. *Rocznik Polskiego Towarzystwa Geologicznego*, 41(3): 419–486.
- Moryc W., 1992. Budowa geologiczna podłoża miocenu w rejonie Sędziszów Małopolski – Rzeszów i ich perspektywiczność. *Nafta-Gaz*, 48(9–10): 205–223.
- Moryc W., 1995. Łądowe utwory paleogenu na obszarze przedgórza Karpat. *Nafta-Gaz*, 51(5): 181–195.
- Moryc W., 1996. Budowa geologiczna podłoża miocenu w rejonie Pilzno–Dębica–Sędziszów Małopolski. *Nafta-Gaz*, 52(12): 521–550.
- Moryc W., 2006. 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., 2018. Utwory jury środkowej przedgórza Karpat na obszarze Wadowice–Busko–Rzeszów, południowa Polska. *Prace Państwowego Instytutu Geologicznego*, 205: 1–55.

- Moryc W., Jachowicz M., 2000. Utwory prekambryjskie w rejonie Bochnia–Tarnów–Dębica. *Przegląd Geologiczny*, 48(7): 601–606.
- Neal J., Risch D., Vail P., 1993. Sequence stratigraphy – a global theory for local success. *Oilfield Review*, 1: 51–62.
- Niemczyk J., 2005. Zarys tektoniki grawitacyjnej gipsów mioceńskich na przedgórzu Karpat w Polsce. *Geologia*, 31(1): 75–126.
- Olszewska B., 1999. Biostratygrafia neogenu zapadliska przedkarpackiego w świetle nowych danych mikropaleontologicznych. *Prace Państwowego Instytutu Geologicznego*, 168: 9–28.
- Oszczypko N., 1996. Mioceńska dynamika polskiej części zapadliska przedkarpackiego. *Przegląd Geologiczny*, 44(10): 1007–1018.
- Oszczypko N., 1998. The Western Carpathian Foredeep – development of the foreland basin in front of the accretionary wedge and its burial history (Poland). *Geologica Carpathica*, 49(6): 415–431.
- Oszczypko N., Krzywiec P., Popadyuk I., Peryt T., 2006. Carpathian Foredeep Basin (Poland and Ukraine) – its sedimentary, structural and geodynamic evolution. *Memoir AAPG*, 84: 239–350.
- Połtowicz S., 1994. Dolnobadeńskie osady rynnowe i śródbadeńska erozja podmorska w okolicy Ropczyc (Dębica–Rzeszów). *Nafta-Gaz*, 50(9): 363–373.
- Połtowicz S., 1998a. Dolnosarmacka delta Szczurowej na tle ewolucji geologicznej przedgórza Karpat. *Geologia*, 24(3): 219–239.
- Połtowicz S., 1998b. Śródkowobadeńska erozja podmorska na przedgórzu Karpat – implikacje poszukiwawcze. *Nafta-Gaz*, 54(5): 209–215.
- Połtowicz S., 1999. Badeńskie olistostromy i stożki turbidytowe okolic Tarnowa (przedgórze Karpat środkowych). *Geologia*, 25(2): 153–187.
- Porębski S., Warchoła M., 2006. Znaczenie przepływów hiperpyknaalnych i klinoform deltowych dla interpretacji sedymentologicznych formacji z Machowa (miocen zapadliska przedkarpackiego). *Przegląd Geologiczny*, 54(5): 421–429.
- Qayyum F., de Groot P., 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.
- Shepard F.P., 1951. Mass movements in submarine canyon heads. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 32(3): 405–418. DOI: 10.1029/TR032i003p00405.
- Szyperko-Teller A., Moryc W., 1988. Rozwój basenu sedymentacyjnego pstręgo piaskowca na obszarze Polski. *Kwartalnik Geologiczny*, 32(1): 53–72.
- 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., Bajewski Ł., Wilk A., 2018. Odzwierciedlenie budowy geologicznej brzeżnej części Karpat i ich podłoża (SE Polska) na podstawie reprocessingu i reinterpretacji profili sejsmicznych 2D. *Prace Naukowe Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego*, 219: 1–174. DOI: 10.18668/PN2018.219.
- 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., Filipowska-Jeziorek K., Bartoń R., Wilk A., 2021. Charakterystyka serii zlepieńcowo-olistostromowej z obszaru paleodoliny Szczurowej–Wojnicza na podstawie interpretacji obrazu sejsmicznego. *Nafta-Gaz*, 77(11): 709–724. DOI: 10.18668/NG.2021.11.01.
- 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.
- Watkinson M.P., Hart M.B., Joschi A., 2007. Cretaceous Tectonostratigraphy and the Development of the Cauvery Basin, Southeast India. *Petroleum Geoscience*, 13: 181–191. DOI: 10.1144/1354-079307-747.
- Wheeler H.E., 1958. Time Stratigraphy. *AAPG Bulletin*, 42: 1047–1063.
- Wheeler H.E., 1964. Baselevel, Lithosphere Surface, and Time-Stratigraphy. *Geological Society of America Bulletin*, 75(7): 599–610.
- 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.
- Złonkiewicz Z., 2006. Ewolucja basenu niecki miechowskiej w jurze jako rezultat regionalnych przemian tektonicznych. *Przegląd Geologiczny*, 54(6): 534–540.
- Złonkiewicz Z., 2009. Profil keloweju i górnej jury w niecce Nidy. *Przegląd Geologiczny*, 57(6): 521–530.
- 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 inżynierjno-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



Dr inż. Anna KWIETNIAK
 Adiunkt w Katedrze Geofizyki
 Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska,
 Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica
 w Krakowie
 al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
 E-mail: anna.kwietniak@agh.edu.pl