

Możliwości identyfikacji stref rozwoju paleokrasu w rejonie przedgórza Karpat na podstawie danych otworowych i sejsmicznych

Possibilities of paleokarst zones identification in the Carpathian Foreland area based on well and seismic data

Mariusz Miziołek, Kinga Filipowska-Jeziorek, Andrzej Urbaniec, Bogdan Filar, Anna Łaba-Biel

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Zainteresowanie utworami węglanowymi górnej jury i dolnej kredy występującymi w podłożu zapadliska przedkarpackiego związane jest głównie z licznymi odkryciami złóż węglowodorów. Pułapki złożowe obecne w tym kompleksie charakteryzują się znacznym udziałem porowatości szczelinowej, związanej między innymi z różnymi formami krasowymi (takimi jak kawerny, brekcje krasowe czy szczeliny), rozpoznanych na podstawie analiz rdzeni i pomiarów geofizyki otworowej. Istotną kwestią, zarówno dla rozwiercania tego typu złóż, jak i prowadzenia dalszych prac poszukiwawczych w tym rejonie, jest szczegółowe rozpoznanie przestrzennego zasięgu stref rozwoju paleokrasu. Zakres wykonanych badań obejmował identyfikację różnych form paleokrasu, przeprowadzoną na podstawie danych otworowych, uzyskanych zarówno podczas wiercenia, jak i eksploatacji złóż, a także na podstawie dostępnych wyników pomiarów upadomierzem sześcioramiennym, sondą akustyczną CAST i skanerem mikroopornościowym XRMI. Interpretację tę powiązano z analizą danych sejsmicznych 3D. Do analizy wykorzystano przede wszystkim atrybuty sejsmiczne, takie jak: *RMS Amplitude*, *Instantaneous Frequency*, *Relative Acoustic Impedance*, *Variance*, dla których uzyskane obrazy najlepiej korespondowały z wyznaczonymi na podstawie danych otworowych interwałami krasowymi. Obserwowane w zapisie sejsmicznym obniżenia częstotliwości, osłabienia amplitudy czy też nieciągłości i brak uporządkowania refleksów sejsmicznych w interwałach rozwoju paleokrasu powiązać można ze wzrostem absorpcji fali sejsmicznej w obrębie stref o zwiększonym zeszcelinowaniu. Przeprowadzona analiza wykazała, że poszczególne rejony obszaru badań cechuje dosyć zróżnicowany zapis atrybutowy, na co wpływ ma m.in. obecność zalegających powyżej ewaporatów miocenu czy też występowanie reaktywowanych dyslokacji. Na znacznej części obszaru badań anomalny zapis sejsmiczny związany ze wspomnianą serią ewaporatową maskuje rzeczywisty charakter przystropowej partii kompleksu węglanowego górnej jury – dolnej kredy, nie pozwalając na jej szczegółową interpretację. W takim przypadku w obrazie sejsmicznym rozpoznawalne są jedynie interwały krasowe występujące w nieco niższej części profilu utworów jury górnej, rozwinięte najczęściej w obrębie kompleksów biohermowych. Na analizowanym zdjęciu sejsmicznym 3D najwyraźniej zaznaczają się jednak strefy rozwoju paleokrasu rozwinięte w otoczeniu paleodolin, jak również formy paleokrasu ściśle związane ze strefami dyslokacji.

Słowa kluczowe: paleokras, złoża ropy i gazu, analiza danych otworowych, atrybuty sejsmiczne.

ABSTRACT: Upper Jurassic and Lower Cretaceous carbonate formations in the Carpathian Foredeep basement are the subject of research mainly due to the numerous oil and gas discoveries. The traps identified to date are characterized by a significant share of fracture porosity, associated with various karst forms (caverns, karst breccias, dissolution fractures) recognized on the basis of core analysis and well-logging data. Recognition of the distribution of paleokarst zones is an important issue for locating production wells and further exploration in the study area. The scope of the research included the identification of various forms of the paleokarst based on well data obtained during drilling and exploitation phase, as well as available measurement results of measurements with 6-arm deepmeter, CAST (Circumferential Acoustic Scanning Tool) and XRMI micro-resistivity scanner integrated with 3D seismic data analysis. Seismic attributes such as RMS Amplitude, Instantaneous Frequency, Relative Acoustic Impedance, and Variance were primarily used for the analysis because they best correlate with the karst intervals determined from the well data. Observed seismic features, such as lowered frequency, amplitude weakening, discontinuities and lack of the seismic reflection structure in the paleokarst intervals, can be associated with an increase in seismic wave absorption within the fracture-cavity zones. The analysis showed that individual regions of the study area are characterized by fairly diverse attribute records, which is influenced by, among others, the presence of the Badenian evaporites located above in close proximity to the top of the carbonate complex, or existence of reactivated dislocations. In a considerable part of the study area an anomalous seismic record connected with the mentioned evaporite series conceals the real character of the seismic image for the topmost part of the Upper Jurassic – Lower Cretaceous carbonate complex and does not allow for its detailed

Autor do korespondencji: M. Miziołek, e-mail: mariusz.miziolek@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 12.01.2022 r. Zatwierdzono do druku: 27.06.2022 r.

interpretation. In this case, only those karst intervals which occur in a slightly lower part of the profile of the Upper Jurassic formations, developed most often within bioherm complexes, are recognizable in the seismic image. However, within the analysed 3D seismic survey the most clearly marked are the paleokarst zones developing in the surroundings of the paleovalleys, as well as the paleokarst forms closely related to the dislocation zones.

Key words: paleokarst, oil and gas fields, well data analysis, seismic attributes.

Wstęp

Na obszarze przedgórz Karpát rozpoznano dotychczas szereg złóż ropy naftowej i gazu ziemnego związanych ze skałami węglanowymi, takimi jak wapień i dolomity. Do tego typu złóż należą: Grobla, Łakta, Łapanów, Tarnów-jura, Dąbrowa Tarnowska, Podborze–Partynia, Brzezówka, Korzeniów i wiele innych.

Skały węglanowe występują powszechnie w podłożu zapadliska przedkarpackiego w obrębie kompleksów zaliczanych do jury górnej – kredy dolnej, a w mniejszym stopniu również kredy górnej. W większości przypadków wspomniane kompleksy węglanowe przykryte są bezpośrednio przez drobnoklastyczne osady badenu oraz ewaporaty, stanowiące doskonałe regionalne uszczelnienie powierzchni stropowej utworów mezozoicznych.

Przeprowadzona analiza archiwalnych materiałów geologiczno-wiertniczych (Miziołek i Filar, 2019) wykazała, że zasadniczą część porowatości w skałach węglanowych stanowi objętość stosunkowo dużych struktur krasowych. Wyniki badań ujawniły obecność struktur krasowych w profilach wielu odwiertów z obszaru centralnej części przedgórz Karpát, co jest udokumentowane zarówno w opisach rdzeni, jak i w zapisie pomiarów geofizycznych. Węglowodory w tych strukturach zajmują częściowo wypełnione lub niewypełnione osadami pustki krasowe, jak też pory, kawerny czy szczeliny występujące w osadach wypełniających te struktury. Obecność form krasowych w strefach złożowych zlokalizowanych w podłożu zapadliska przedkarpackiego niesie ze sobą pewne konsekwencje istotne dla poszukiwań oraz eksploatacji tego typu złóż; najważniejsze z nich są następujące:

- formy krasowe występują nie tylko w bezpośrednim sąsiedztwie erozyjnej powierzchni jury i kredy, ale również kilkadziesiąt (a niekiedy i więcej) metrów poniżej tej powierzchni, co wymaga wiercenia otworów o większej głębokości;
- ułożenie struktur krasowych i ich przestrzenny rozwój w znacznym stopniu nawiązują do tektoniki i azymutu przebiegu szczelin i uskoków w rejonie poszczególnych złóż, co jest bardzo istotne w kontekście projektowania trajektorii otworów wiertniczych;
- w obrębie złoża występują często nie tylko pojedyncze formy krasowe, ale także całe ich ciągi, tworzące pojedynczy

system krasowy albo nawet kilka takich systemów, które mogą posiadać łączność hydrodynamiczną lub też są odizolowane od siebie nawzajem; brak łączności oznacza, że pewna część zasobów złoża (czasami duża) może zostać niewydobyta przy aktualnym stanie rozwiercenia i opróbowania danego poziomu złożowego;

- model pojemności złożowej w złożu krasowo-szczelinowym stwarza możliwość, że pułapką złożową mogą być elementy lub też całe systemy krasowe występujące nie tylko w szczycie struktury, ale także np. na stoku wyniesienia;
- szczegółowe rozpoznanie zasięgu formacji krasowych może wpłynąć na zwiększenie atrakcyjności poszukiwań w obszarze badań poprzez wskazanie nowych stref potencjalnie nasyconych węglowodorami.

Stosunkowo liczne przykłady przedstawiające próby wykorzystania danych sejsmicznych do bardziej szczegółowego rozpoznania węglanowych formacji złożowych związanych z rozwojem paleokrasu znaleźć można w literaturze światowej (np. Carrillat et al., 2005; Zhang i Liu, 2009; Black, 2012; Skvortsov et al., 2014; Moser, 2016; Basso et al., 2018). Najwięcej tego typu przykładów, dotyczących rozpoznania akumulacji węglowodorów, których występowanie bezpośrednio związane jest z potężnymi systemami krasowymi, pochodzi z obszaru Chin. Przedmiotem intensywnych badań był m.in. paleokras rozwinięty w utworach mezozoicznych i permskich w basenie Syczuan (Dai et al., 2017; Gao et al., 2020) oraz w utworach ordowickich w basenie Tarim (Tian et al., 2014, 2017; Xu et al., 2017; Gao et al., 2018; Lu et al., 2020; Ukar et al., 2020).

W ramach niniejszego opracowania do analizy rozpręstrzenia paleokrasu w utworach węglanowych górnej jury i dolnej kredy wykorzystane zostało przykładowe zdjęcie sejsmiczne 3D z obszaru centralnej części przedgórz Karpát. Zgodnie z założeniami wykonana analiza atrybutów sejsmicznych miała wykazać, jakie są możliwości identyfikacji stref rozwoju paleokrasu w obszarze przedgórz Karpát na podstawie dostępnych danych sejsmicznych. W interpretacji wykorzystano głównie takie atrybuty sejsmiczne jak: *Instantaneous Frequency*, *RMS Amplitude*, *Relative Acoustic Impedance*, *Variance* oraz *Chaos*. Przeprowadzona interpretacja pozwoliła na wytypowanie obszarów o potencjale krasowym zarówno w obrębie rozpoznanych już złóż węglowodorów, jak i poza ich obszarami.

Rozwój form paleokrasu w aspekcie formowania się pułapek dla akumulacji węglowodorów

Struktury paleokrasu mogą mieć istotne znaczenie dla akumulacji węglowodorów w skałach węglanowych. Na ogół skały te, poza nielicznymi wyjątkami (np. rafami czy barierami węglanowymi), charakteryzują się słabymi parametrami petrofizycznymi, takimi jak porowatość i przepuszczalność. Sytuacja ta może jednak ulec zmianie w przypadkach, gdy skały węglanowe zostaną poddane procesom tektonicznym i krasowym. Procesy krasowe prowadzą głównie do rozpuszczania skał węglanowych, powodując poszerzenie szczelin oraz tworzenie różnego typu struktur, takich jak jamki i kanały, kawerny, komory, a także korytarze, jaskinie, kominy czy leje krasowe. Część z tych form powstaje na powierzchni terenu i w strefie przypowierzchniowej, natomiast pozostała część tworzy się głęboko pod powierzchnią, prowadząc do formowania systemów jaskiń krasowych, jedno- lub rzadziej wielopiętrowych. Po pogrzebaniu formacji skalnej tego typu struktury krasowe mogą zostać zachowane w całości jako puste przestrzenie lub też w różnym stopniu wypełniane są osadami wtórnymi. Materiał wypełniający może być transportowany z zewnątrz lub też może pochodzić z bezpośredniego niszczenia ścian i stropów różnych form krasowych. Ponadto osady wypełniające struktury mogą być również wytrącane na drodze chemicznej z roztworów krążących w skałach.

Pogrzebane formy paleokrasu rozwinięte w formacjach węglanowych, w przypadku gdy nie zostaną wypełnione osadami wtórnymi lub też wypełnienie będzie tylko częściowe, mogą stanowić potencjalne pułapki dla akumulacji węglowodorów. Węglowodory gromadzą się najczęściej w partiach przystropowych formacji węglanowych, ale pułapki złożowe o genezie krasowej mogą tworzyć się także w głębszych partiach profilu (np. w postaci studni czy komór krasowych). W obrębie tego typu złóż może dochodzić do łączności hydrodynamicznej pomiędzy poszczególnymi formami czy też systemami paleokrasu bądź też złoża te mogą tworzyć niezależne systemy hydrodynamiczne. Istotną kwestią jest jednak obecność skał uszczelniających, ekranujących pułapki złożowe. W przypadku dobrej łączności hydrodynamicznej złoża węglowodorów występują w postaci izolowanych elementów, związanych ściśle z elewacjami strukturalnymi, a w przeciwnym przypadku może dojść do akumulacji w pułapkach innych niż strukturalne. Wówczas złoża zlokalizowane są nie tylko w szczytowych partiach struktur, ale także na ich skłonach, a czasami nawet w morfologicznych obniżeniach.

Kolejnym, wspomnianym już, ważnym elementem w kontekście poszukiwań złóż węglowodorów w strukturach paleokrasu jest stopień ich wypełnienia przez osady wtórne. Struktury krasowe już na etapie ich formowania mogą być

wypełniane osadami syngenetycznymi, jak np. wypełnienia materiałem klastycznym studni krasowych. Innym przykładem tego typu wypełnień mogą być osady powstające w komorach i jaskiniach, reprezentowane przez gruz wapienny, pochodzący z niszczenia ścian i stropów, oraz rezydualny materiał ilasto-mułowcowo-piaszczysty, nanoszony przez wody i deponowany w formie namuliska. Często na tym etapie rozwoju krasu tworzą się również osady pochodzenia chemicznego, takie jak polewy kalcytowe, stalaktyty, stalagmity i inne formy powstające w wyniku wytrącania węglanu wapnia z nasyconych roztworów. W czasie pogrążania często następuje też samoistne zawalanie się form krasowych. W kolejnym etapie może dochodzić do dalszego zapełniania pustek krasowych materiałem krystalicznym pochodzącym z roztworów wodnych krążących w skałach, niekiedy o charakterze hydrotermalnym. W ten sposób tworzą się żyły i druzi kalcytowe, a czasami również kwarcowe, jak również inne nagromadzenia mineralne. Proces wypełniania struktur zachodzi najczęściej od stref usytuowanych strukturalnie najniżej, w wyniku czego największym stopniem wypełnienia charakteryzują się obszary obniżeń krasowych oraz dolna część stoku, podczas gdy najniższy stopień wypełnienia występuje w szczycie struktury. Taki model wypełnienia opisywany jest między innymi na złożu ropy naftowej Rospo Mare, usytuowanym w strefie Morza Adriatyckiego (Dubois et al., 1993; Fournillon et al., 2017).

Przykłady złóż ropy naftowej i gazu ziemnego związanych z paleokrasem

Złoża związane z paleokrasem w skałach węglanowych eksploatowane są w wielu krajach świata, m.in. w Kanadzie, USA, Meksyku, Wenezueli, Brazylii, Arabii Saudyjskiej, Iraku, Rosji, Kazachstanie, a także na Morzu Północnym i Morzu Barentsa (Dembicki i Machel, 1996; Huebscher i Machel, 1997; Carrillat et al., 2005; Castillo i Mann, 2006; Black, 2012; Moser, 2016; Basso et al., 2018; Aboaba i Liner, 2021), jednak najbardziej spektakularne przykłady tego typu złóż znajdują się w Chinach. Rozpoznano tam szereg basenów naftowych, w tym m.in.:

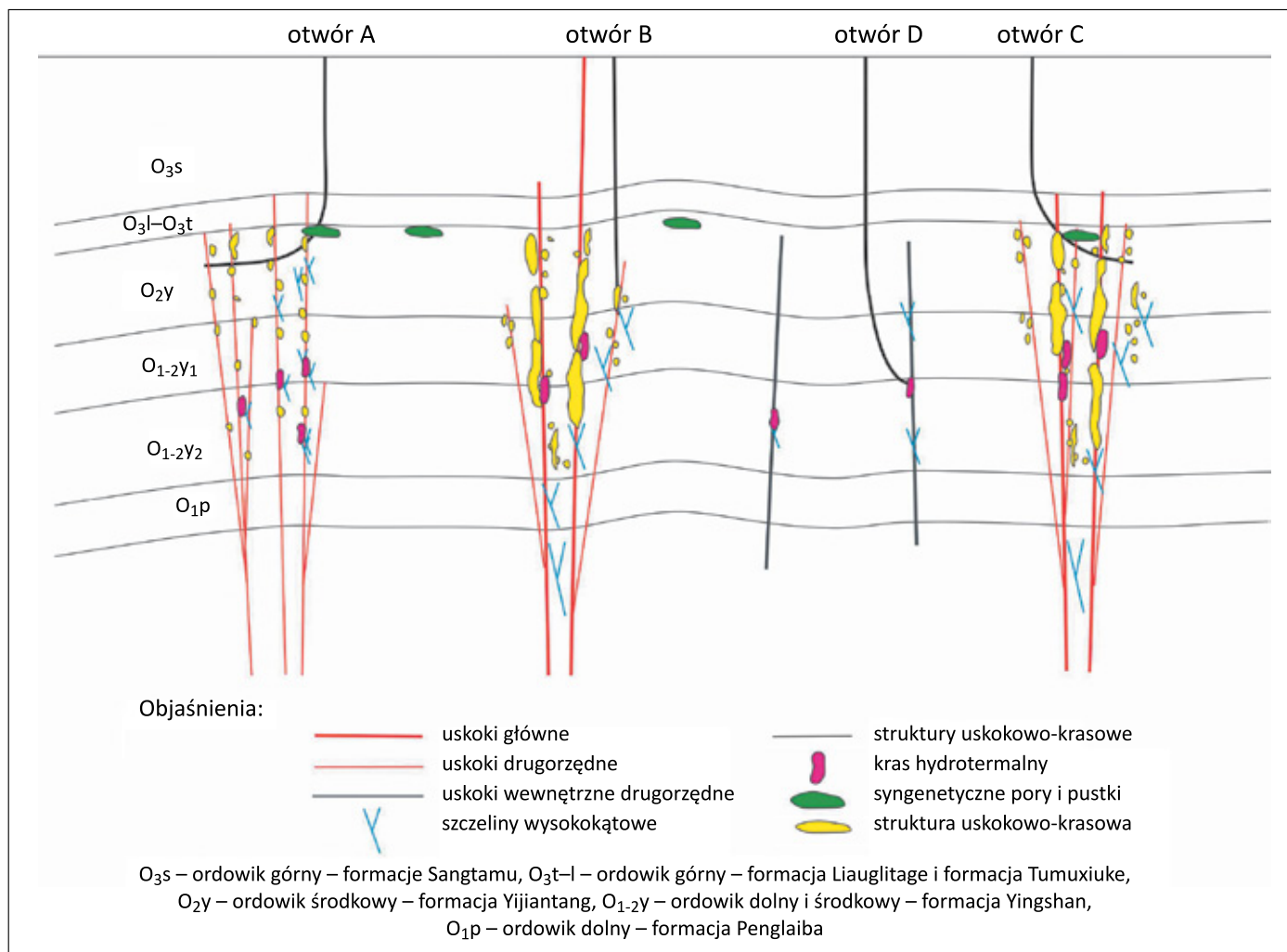
- basen zatoki Bo-Hai, obejmujący utwory węglanowe dolnego i środkowego paleozoiku, z polami naftowymi Huaberi i Dagang, położony na wschód od Pekinu i ciągnący się w kierunku zatoki Bo-Hai (Zhang i Liu, 2009);
- basen Ordos, ze złożami węglowodorów zlokalizowanymi w utworach od proterozoiku po mezozoik, w tym zwłaszcza z węglanowymi utworami ordowiku i największym złożem gazu związanym z formami paleokrasu – Jingbian (Tang et al., 2018; Yang et al., 2021), o zasobach rzędu 11 bilionów m³ (Zhang i Liu, 2009);

- basen Syczuan, ze złożami węglowodorów związanymi m.in. z formacją Maokou, wieku wczesnopermskiego (Dai et al., 2017); basen ten położony jest na południe od basenu Ordos;
- basen Tarim, będący największym w Chinach basenem zawierającym utwory węglanowe z rozwiniętymi formami paleokrasu, które stanowią pułapki dla złóż ropy i gazu; skałami zbiornikowymi są utwory ordowiku należące m.in. do formacji Yingshan, Lianglitage, Penglaiba czy Halahatang (Zhang et al., 2017; Gao et al., 2018; Li et al., 2018; Ding et al., 2020; Lu et al., 2020); całkowite zasoby ropy udokumentowane w basenie Tarim wynoszą około 1108 mln ton (Ding et al., 2020).

Warto zaznaczyć, że złoża w utworach węglanowych związane z paleokrasem odkryto w Chinach nawet na znacznych głębokościach, rzędu 3–7,5 km (Ding et al., 2020). Spośród odwiertów wierconych na polu Tazhong I pustki krasowe stwierdzono m.in. w odwiercie Tazhong 62-1 w interwale 4784–4798,4 m (czyli o wysokości 14 m), gdzie miały charakter dużych kawern, rozwiniętych pomiędzy kryształami

kalcytu. Obecność jaskiń stwierdzono w profilach odwiertów Tazhong 62 i Tazhong 82, odpowiednio na głębokościach 4713,5–4742,2 m oraz 5440–5487 m. W obrębie złoża Lungu w basenie Tarim jaskinie z częściowym wypełnieniem lub bez wypełnienia znajdują się w kilku poziomach w interwale 5700–6250 m (Zhang i Liu, 2009).

Badania prowadzone w Chinach wskazują, że największą produktywnością w złożach związanych z rozwojem paleokrasu cechują się głębokie strefy uskokowe, wzdłuż których doszło do silnego rozwoju zjawisk krasowych (Ding et al., 2020) (rysunek 1). W tego typu formacjach zjawiska krasowe rozwijają się zarówno w profilu pionowym, jak też w planie poziomym. Ich powierzchnia jest na ogół niewielka, jednak w profilu pionowym ich wysokość może sięgać nawet 300 m. Zasoby w tego typu strefach osiągają wielkość do 80% zasobów całego złoża. Również wydajność odwiertów lokalizowanych w tego typu strefach jest najwyższa – i przykładowo w obszarze South Tahe sięga ona średnio 61 t/dobę, natomiast w strefach uskokowych drugiego rzędu lub w strefach kompresji wydajność wynosi do 39 t/dobę.



Rysunek 1. Model rozprzestrzenienia stref uskokowo-krasowych w obszarze South Tahe (Ding et al., 2020)

Figure 1. Model of the spread of karst fault zones in the South Tahe area (Ding et al., 2020)

Złoża związane z paleokrasem znane są również z wielu obszarów na terenie Europy:

- obszar złożowy Gohta i Alta na Morzu Północnym, gdzie w latach 2013–2014 wykonano otwory wskazujące na obecność akumulacji węglowodorów w strukturach paleokrasowych (Lønøy, 2021);
- obszar złożowy związany z rejonem Loppa High, położonym na obszarze Morza Barentsa, Norwegia (Carrillat et al., 2005);
- złożo Rospo Mare, leżące pod Adriatykiem na głębokości około 1300 m, w odległości 20 km od brzegu Włoch. Datuje się, że struktury krasowe w wapieniach kredowych w tym złożu rozwinęły się w okresie oligocen–miocen (Soudet et al., 1994; Fournillon et al., 2017). Są one wykształcone w strefach: wadcycznej, perkolacyjnej oraz freatycznej. W pierwszych dwóch strefach występują głównie pionowe formy krasowe, takie jak szczeliny i studnie, podczas gdy w ostatniej dominują struktury poziome (korytarze, grotty i komory). Najlepsze wydajności z odwiertów uzyskano w partii szczytowej złoża, w której stwierdzono najmniejszy stopień wypełnienia form paleokrasu osadami wtórnymi;
- złożo Casablanca na Morzu Śródziemnym, w pobliżu wybrzeży Hiszpanii (Rodríguez-Morillas et al., 2013; Navarro, 2019), rozwinięte w skrasowiałych utworach kredy i jury na głębokości około 2465 m (szczyt najpłycej leżącej kulminacji). W obrębie złoża odwiercono 18 otworów (pionowych lub horyzontalnych), a w trakcie eksploatacji wykonywano liczne zabiegi kwasowania. Maksymalnie wydobywano 44 tys. baryłek ropy dziennie. W roku 2018 wydobyte ropy wynosiło 800 baryłek dziennie przy 35 tys. baryłek wody. Pod względem geologicznym złożo to rozpoznane jest raczej słabo, z uwagi na niewielką liczbę pobranych rdzeni oraz stosunkowo płytkie otwory wiertnicze (Navarro, 2019).

Zarys budowy geologicznej rejonu badań

Obszar badań usytuowany jest w centralnej części zapadliwa przedkarpackiego, a w odniesieniu do najstarszych pięter strukturalnych – na obszarze bloku małopolskiego.

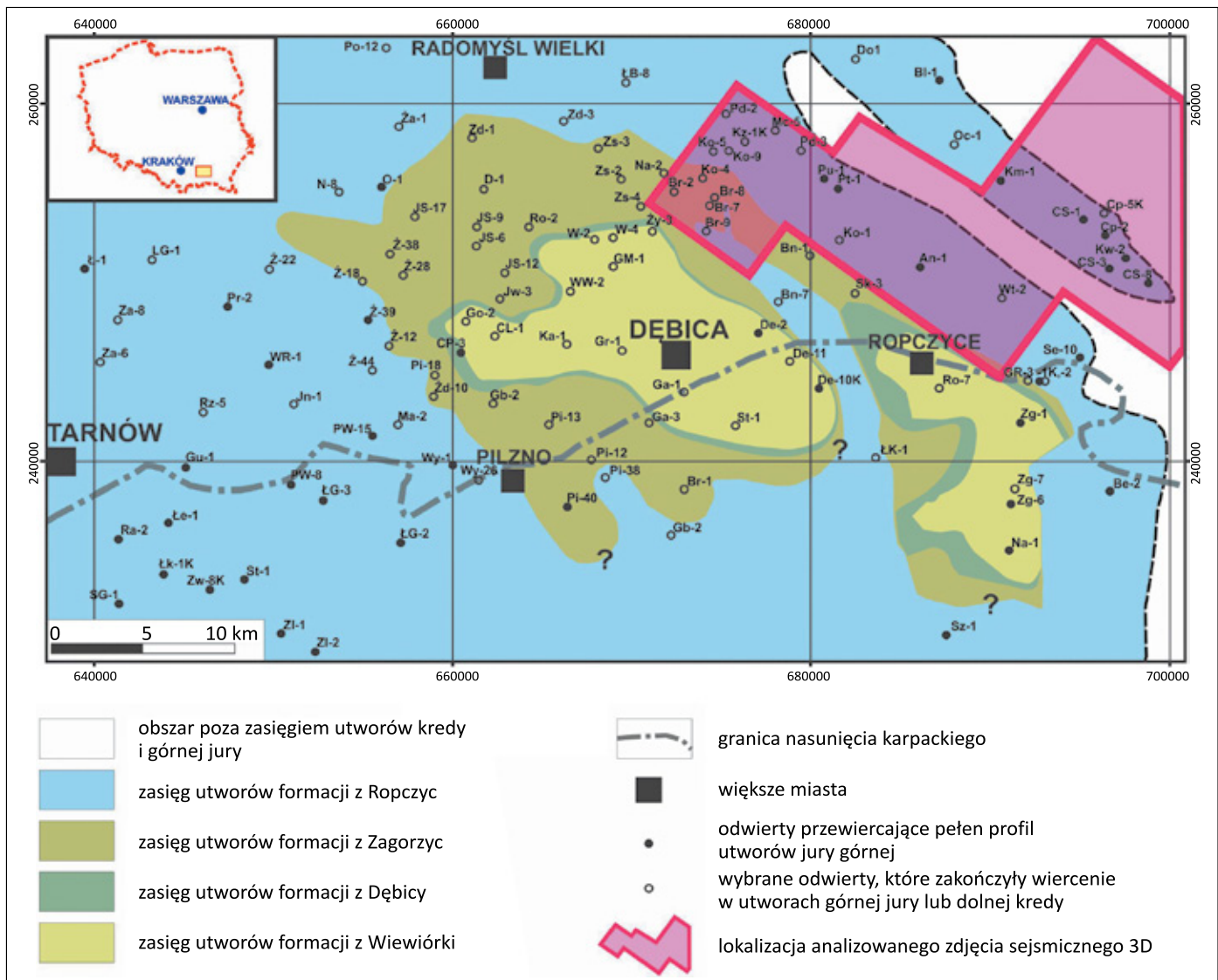
Najniższe piętro strukturalne w obszarze badań stanowi seria anchimetamorficznych skał neoproterozoiku, związanych genetycznie z blokiem małopolskim (rysunek 2). Seria ta reprezentowana jest przez sekwencję skał klastycznych (głównie ilowców i mułowców), silnie zdiagenezowanych i w niewielkim stopniu przeobrażonych procesami metamorfizmu regionalnego (metaargility, fyllity). W profilu paleozoiku dominują węglanowe utwory środkowego–górnego dewonu i dolnego karbonu, a jedynie w skrajnie SE części obszaru

w ich podłożu występują również utwory ordowiku i syluru (*vide* Moryc, 1992, 1996; Buła i Habryn, 2008).

Utwory triasu w obszarze badań występują lokalnie, zwłaszcza 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; Szyperko-Teller i Moryc, 1988; Becker i Nawrocki, 2007). Lokalnie w nadkładzie występują również osady marglisto-wapienne, z wtrąceniami skał siarczanowych, zaliczane do retu (górnego pstrego piaskowca) i wapienia muszlowego.

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 wapienie zapiaszczone.

Profil jury górnej rozpoczyna stosunkowo jednolity litologicznie kompleks pelitycznych osadów wapienno-marglistych, dobrze udokumentowanych mikrofaunistycznie, określane jako seria gąbkowo-globuligerinowa (Gutowski et al., 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. Wyróżnić tutaj można trzy podstawowe ogniwa: biohermowe, detrytycznych wapieni gąbkowych oraz marglisto-wapienne (Gutowski et al., 2007). O ile w zasadzie niemożliwe jest rozdzielenie tej sekwencji na podstawie badań mikropaleontologicznych, to jednak jej duża zmienność litologiczna w dość dobrym stopniu odzwierciedla się zarówno na wykresach profilowań geofizyki otworowej, jak i w obrazie sejsmicznym (Gliniak et al., 2005; Urbaniec, 2021). Najbardziej charakterystycznym elementem, wyróżniającym się w budowie geologicznej rejonu, są budowle organiczne o charakterze mikrobialno-gąbkowym (Morycowa i Moryc, 1976; Bobrek et al., 2000; Gliniak et al., 2000; Matyja, 2009), których kompleksy niekiedy mogą osiągać dość znaczne rozmiary (przekraczające nawet 500 m miąższości). Wyżej w profilu jury górnej zalega seria koralowcowo-onkolitowa, zawierająca liczne pokruszone i zabradowane fragmenty makrofauny, wśród których dominują koralowce i mięczaki, w tym gruboskorupowe małże. Lokalnie pojawiają się także przewarstwienia wapieni detrytycznych o znacznym udziale oolitów (Złonkiewicz, 2006, 2009). Kolejnym ogniwnem litostratygraficznym są płytkowodne osady węglanowe zaliczane do serii muszlowcowo-oolitowej dolnej, z charakterystycznymi przewarstwieniami wapieni organodetrytycznych, oolitowych, onkolitowych oraz warstwami muszlowców ostrygowych. Zgodnie z wynikami badań przeprowadzonych w ostatnim dziesięcioleciu w obrębie profilu tego właśnie ogniwa znajduje



Rysunek 2. Lokalizacja obszaru badań na tle zasięgu utworów jury górnej i kredy dolnej w środkowej części przedgórzia Karpat (Urbaniec et al., 2010, częściowo zmienione)

Figure 2. Location of the research area against the range of Upper Jurassic and Lower Cretaceous formations (Urbaniec et al., 2010, partially modified)

się granica jura–kreda (*vide* Gutowski et al., 2007; Matyja i Barski, 2007; Matyja, 2009; Urbaniec et al., 2010; Świątlik et al., 2011). Utwory jury górnej w obszarze badań zostały rozpoznane wieloma otworami, zwłaszcza w północnej części obszaru. Z kolei w części wschodniej obszaru badań utwory jury zostały całkowicie usunięte przez procesy erozji.

Spośród młodszych ogniów litostratygraficznych, zaliczanych do kredy dolnej, w obszarze badań stwierdzono występowanie jedynie serii marglisto-muszlówcowej, cechującej się dużą zmiennością lateralną (Gutowski et al., 2007; Urbaniec et al., 2010), dla której charakterystyczne jest występowanie naprzemianległych warstw utworów wapiennych oraz marglisto-ilastych.

W obszarze badań w zasadzie brak jest utworów kredy górnej, z wyjątkiem jego skrajnie NW części, gdzie ich

występowanie stwierdzono w wąskiej strefie rozciągającej się pomiędzy otworami Zs-2 i Br-2 (rysunek 2).

Najbardziej rozległa powierzchnia krasowa na obszarze przedgórzia Karpat rozwinęła się w stropowej partii kompleksu węglanowego górnej jury–dolnej kredy. Pierwszy etap jej rozwoju przypada na późną wczesną kredę. Drugi etap rozwoju procesów krasowych rozpoczął się najprawdopodobniej u schyłku późnej kredy i trwał przez znaczną część paleogenu, obejmując swym zasięgiem zdeponowane w tym czasie utwory kredy górnej. Na znacznej części obszaru przedgórzia Karpat (w tym również w obszarze badań) utwory górnej kredy zostały całkowicie usunięte, a zjawiska krasowe rozwijały się ponownie w utworach kompleksu jurajsko-dolnokredowego. Etap ten był ściśle związany z intensywną erozją i rozwojem paleodolin, głęboko wcinających się w utwory podłoża mezozoicznego

i dominujących w obecnej morfologii powierzchni stropowej mezozoiku (*vide* Jawor, 1983; Połtowicz, 1998, 1999; Karnkowski i Ozimkowski, 2001, wraz z literaturą).

Utwory paleogenu w obszarze badań występują jedynie w jego skrajnie SE części, jednak ich zasięg w kierunku N i NW nie jest dobrze rozpoznany, można więc przypuszczać, że wypełniają one największe obniżenia podłoża. Zostały one rozpoznane w kilku otworach usytuowanych na SE od obszaru badań.

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 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. Granice obydwu wspomnianych wydziałów 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.

Wyżej w profilu utworów miocenu występuje seria ewaporatowa badenu, która w obszarze badań reprezentowana jest przez utwory siarczanowe, anhydryty i gipsy, wydzielane jako formacja z Krzyżanowic (Alexandrowicz et al., 1982).

Zróżnicowany pod względem litologicznym i facjalnym kompleks utworów silikoklastycznych zalegających powyżej serii ewaporatowej w całości zaliczany jest do formacji z Machowa (Alexandrowicz et al., 1982). Formacja ta charakteryzuje się znaczną różnorodnością litologiczną.

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

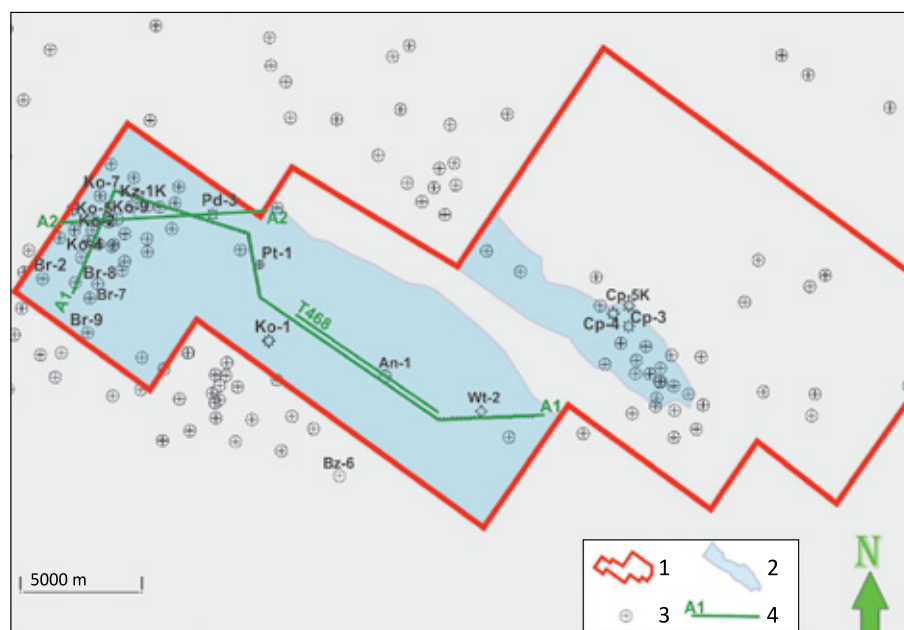
Dostępne dane i metodyka badań

Głównym celem badań była identyfikacja struktur krasowych w utworach węglanowych wieku jurajsko-wczesnokredowego na przykładzie wybranego zdjęcia sejsmicznego 3D z obszaru przedgórzia Karpat (rysunek 3).

Identyfikację struktur krasowych przeprowadzono wielokierunkowo, wykorzystując następujące materiały:

- dokumentacje wynikowe otworów wiertniczych (jeśli były dostępne), zwłaszcza opisy i fotografie rdzeni, opisy prac wiertniczych, jak również wyniki przeprowadzonych prób złożowych (w sumie przeanalizowano dane z około 50 otworów);
- pomiary geofizyki otworowej, w tym głównie profilowania: gamma, oporności, średnicy, a w przypadku nowszych odwiertów również pomiary gęstości, akustyczne, wyniki pomiarów upadomierzem sześcioramiennym, sondą akustyczną CAST i skanerem mikroopornościowym XRMI;
- dostępne dane sejsmiczne 3D (zdjęcie o powierzchni około 350 km²).

W pierwszym etapie analizie poddano zestaw danych dotyczących opisów rdzeni, przebiegu wiercenia oraz wyników opróbowania. Należy podkreślić, że formy paleokrasu często w mniejszym lub większym stopniu wypełnione są osadem wtórnym, który składem mineralnym i strukturą odbiega od skał otaczających. Na podstawie literatury (Huebscher i Machel, 1997; Zhang i Liu, 2009; Black, 2012; Tian et al., 2014; Xu et al., 2017; Gao et al., 2018; Li et al., 2018) oraz wcześniej prowadzonych prac (*vide* Miziołek i Filar, 2019) zdefiniowano typ i charakter osadów mogących stanowić wypełnienie form paleokrasu. W ten sposób wyznaczono interwały potencjalnego występowania osadów wykazujących cechy wtórnych wypełnień struktur krasowych.



Rysunek 3. Usytuowanie analizowanego zdjęcia sejsmicznego 3D (1) wraz z zasięgiem utworów jury górnej i kredy dolnej (2), lokalizacją otworów wiertniczych (3) i prezentowaniem w artykule profili sejsmicznych (4)

Figure 3. Location of the 3D seismic survey (1) against the range of the Upper Jurassic and Lower Cretaceous formations (2) and location of the wells (3) and discussed seismic sections (4)

W etapie drugim wyniki tej interpretacji poddane zostały weryfikacji z wykorzystaniem pomiarów geofizyki otworowej.

W kolejnym etapie badań przeprowadzono analizę danych sejsmicznych 3D (rysunek 3). Do interpretacji wybrano temat sejsmiczny złożony z fragmentów trzech zdjęć sejsmicznych 3D (połączonych w jeden wolumen sejsmiczny), wykonanych w terenie w latach 2001–2007, opracowany w roku 2016 w Geofizyce Toruń SA. Wykonana analiza obejmowała obliczenie szeregu atrybutów objętościowych (*Instantaneous Frequency*, *RMS Amplitude*, *Relative Acoustic Impedance*, *Variance*, *Amplitude Contrast*, *Edge Evidence*, *Chaos*) oraz atrybutów powierzchniowych, a następnie powiązanie otrzymanych danych z potencjalnymi interwałami o charakterystyce krasowej, które wyznaczono na podstawie danych otworowych. Mapy atrybutów powierzchniowych obliczono dla różnych bramek czasowych liczonych względem powierzchni stropowej jury górnej i kredy dolnej (horyzont sejsmiczny J3-K1_str).

Identyfikacja form paleokrasu na podstawie danych otworowych

Zapis geofizyczny związany z interwałami rozwoju paleokrasu może przedstawiać się następująco:

- na profilowaniach gamma często (choć nie zawsze) obserwuje się nagły wzrost wartości związany ze wzrostem zailenia w osadzie wtórnym wypełniającym pustki krasowe;
- na profilowaniach oporności zwykle obserwuje się spadek wartości (w strefie zawodnionej) w obrębie utworów wypełniających formy krasowe, co związane jest ze wzrostem porowatości tych utworów (szczególnie w przypadku piaskowców lub mułowców);
- zwiększenie średnicy otworu w interwałach rozwoju paleokrasu związane ze zmianą litologii oraz zwykle mniejszym stopniem diagenety osadów jaskiniowych;
- na profilowaniach gęstości zwykle obserwowany jest spadek wartości wynikający z mniejszego stopnia diagenety i cementacji osadów oraz z obecności licznych pustek;
- na profilowaniach akustycznych często zaznacza się spadek prędkości przebiegu fali akustycznej spowodowany mniejszą gęstością i większą porowatością;
- w zapisie upadomierza sześcioramiennego obserwuje się różnice w upadach pomiędzy skałami węglanowymi a osadami wtórnymi;
- w obrazie amplitudowym sondy akustycznej CAST często widoczne jest wyraźne zróżnicowanie gęstości pomiędzy skałami węglanowymi a osadem wtórnym wypełniającym paleokawerny; obraz ten charakteryzuje się znacznie większą rozdzielczością niż standardowe pomiary geofizyczne i upadomierz;

- w obrazie skanera XRMI struktury paleokrasu zapisują się jako elementy nisko- lub wysokooporowe – w zależności od rodzaju wypełnienia lub jego braku.

Wysoka rozdzielczość pomiarów CAST i XRMI umożliwia interpretację wielu szczegółów związanych zarówno z budową strukturalną, jak i zróżnicowaniem litologicznym. Na tej podstawie możliwa jest identyfikacja poszczególnych warstw oraz szczelin wraz z określeniem ich parametrów (upadów, azymutów), rozpoznanie struktur sedimentacyjnych czy też charakteru wypełnień osadami wtórnymi.

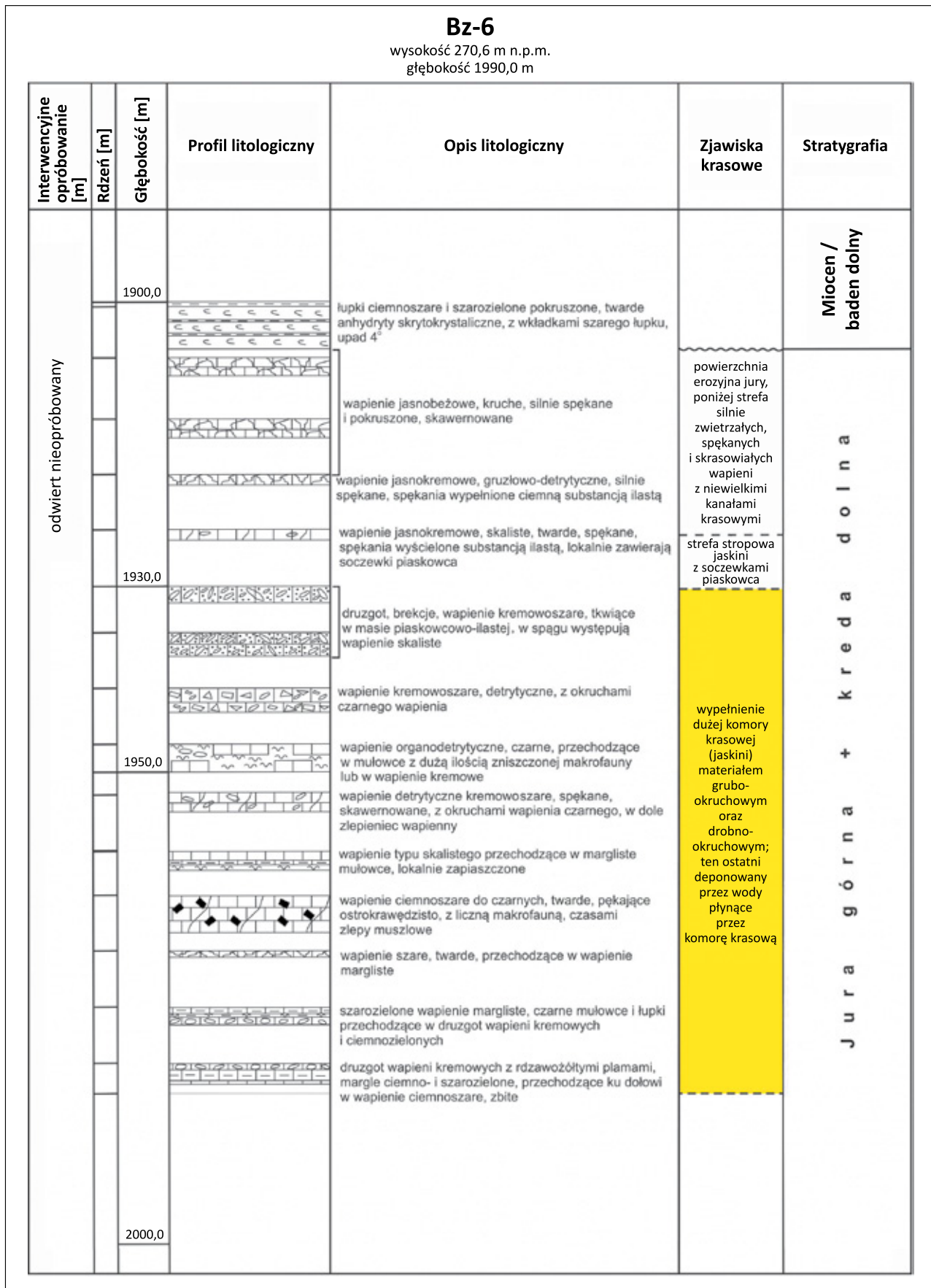
Przykładowe interpretacje danych otworowych przedstawiono na rysunkach 4 i 5.

Identyfikacja form paleokrasu na podstawie danych sejsmicznych

Zgodnie z danymi literaturowymi (np. Zou, 2013) występowanie struktur paleokrasu w skałach węglanowych powinno charakteryzować się obserwowaną w zapisie sejsmicznym nieciągłością i brakiem uporządkowania refleksów, obniżeniem wartości częstotliwości oraz wyraźnym osłabieniem wielkości amplitud atrybutu *RMS Amplitude*, co związane jest ze wzrostem absorpcji fali przez strefy o zwiększonym stopniu zeszczelinowacenia czy też osłabienia struktury skały.

Na przekroju sejsmicznym A1, przedstawionym w wersjach atrybutów sejsmicznych *RMS Amplitude*, *Instantaneous Frequency* oraz *Relative Acoustic Impedance* (rysunek 6), można dostrzec w miarę zgodną korelację obniżenia wartości atrybutów z wyznaczonymi na podstawie danych otworowych interwałami rozwoju paleokrasu. Jest to szczególnie widoczne w przypadku otworów zlokalizowanych w północno-zachodniej części rejonu badań. Z kolei rejon otworu An-1 wykazuje zupełnie odmienną charakterystykę sejsmiczną. Widoczne obniżenia wartości atrybutów *RMS Amplitude* (rysunki 6A i 7B) i *Instantaneous Frequency* (rysunek 7B), jak również podwyższone wartości atrybutów *Variance* (rysunek 7A) i *Chaos* można powiązać jedynie z interwałem wyznaczonym w głębszej części profilu utworów jury, w którym rozpoznana została budowla organiczna o charakterze biohermowym. Jej kształt najlepiej obrazują mapy atrybutu powierzchniowego *RMS Amplitude* obliczone w bramce od –50 ms do –150 ms względem stropu horyzontu J3-K1_str, na których zauważyć można strefy anomalnie niskich wartości, odpowiadające lokalizacji wyinterpretowanych budowli organicznych w tym rejonie (rysunek 8).

W najlepiej rozpoznanej wiertniczo północno-zachodniej części analizowanego zdjęcia sejsmicznego (rysunek 3), w której widoczne jest również znaczne zagęszczenie stref uskoku, wyinterpretowane dyslokacje dobrze korelują



Rysunek 4. Profil litologiczny otworu Bz-6 opracowany na podstawie opisów rdzeni z zaznaczonym interwałem rozwoju paleokrasu (kolor żółty)

Figure 4. Lithological profile of the Bz-6 well compiled on the basis of core descriptions with the paleokarst interval highlighted (yellow)

się z wynikami prezentowanymi na przekrojach i mapach w odwzorowaniu atrybutów *Chaos* i *Variance*. Wyznaczone w tej strefie w otworach potencjalne interwały rozwoju form paleokrasu najlepiej korespondują z obniżonymi wartościami *RMS Amplitude* (rysunek 6A), a jedynie częściowo pokrywają się z wynikami prezentowanymi na przekrojach w wersji atrybutów *Instantaneous Frequency* oraz *Relative Acoustic Impedance* (rysunki 6B, 6C).

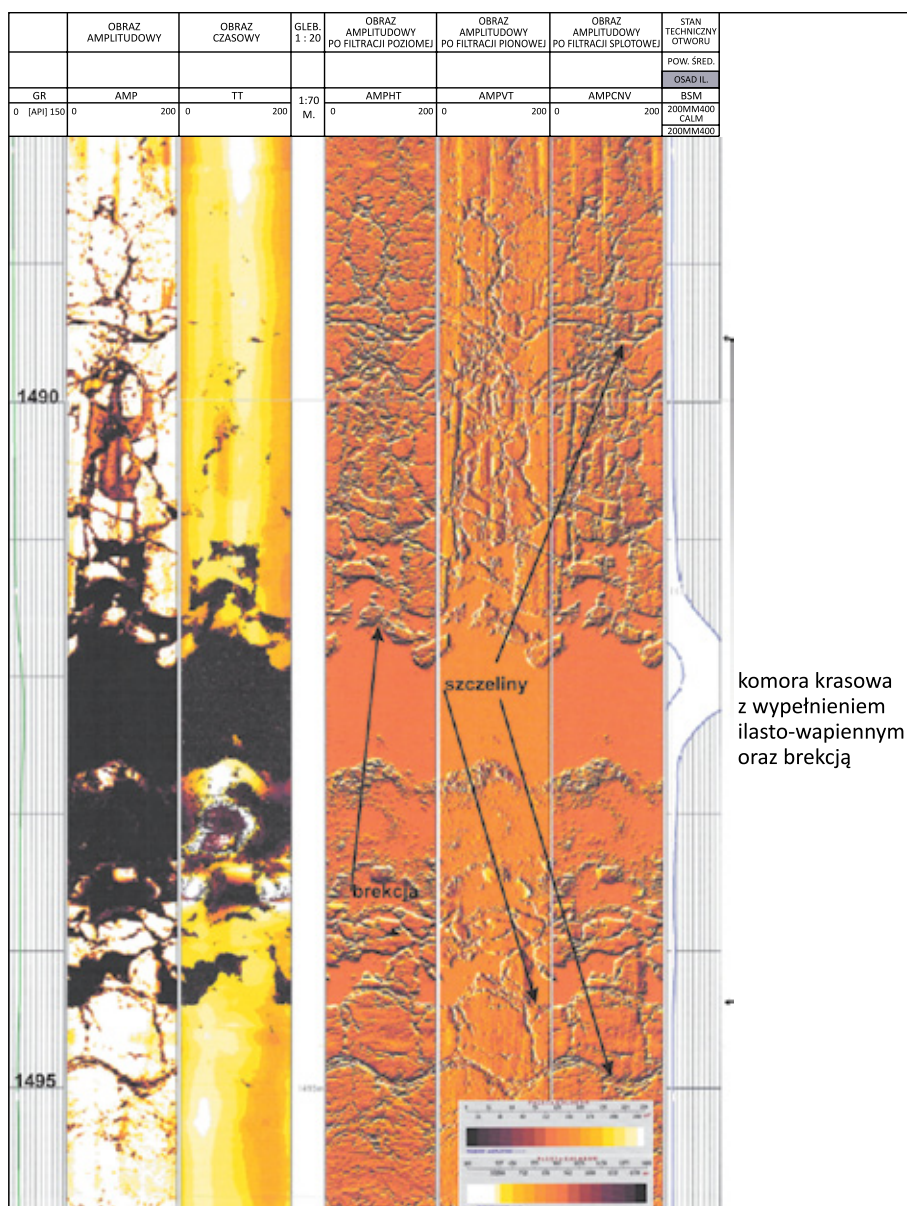
Interesującym przykładem z omawianego rejonu jest strefa usytuowana w najbliższym sąsiedztwie otworu Pd-3, w której obliczone niskie wartości atrybutów *RMS Amplitude* (rysunki 6A i 10) i *Relative Acoustic Impedance* (rysunek 6C) wyjątkowo

dobrze korelują z interwałami krasowymi wyznaczonymi na podstawie danych wiertniczych. W rejonie północno-zachodnim analizowanego zdjęcia, jak również w strefie otworu Pd-3 na mapach atrybutu powierzchniowego *RMS Amplitude* zaobserwować można anomalnie niskie wartości (rysunki 8 i 9). Jest to szczególnie widoczne na mapie obliczonej w bramce obejmującej część przystropową kompleksu węglanowego J3+K1 (tj. w bramce od -30 ms do horyzontu J3-K1_str) (rysunek 9).

Na podstawie analizy obrazów przestrzennych kombinacji atrybutów *RMS Amplitude* i *Variance* można stwierdzić, że rozwój form paleokrasu w północno-zachodniej części analizowanego zdjęcia sejsmicznego najprawdopodobniej

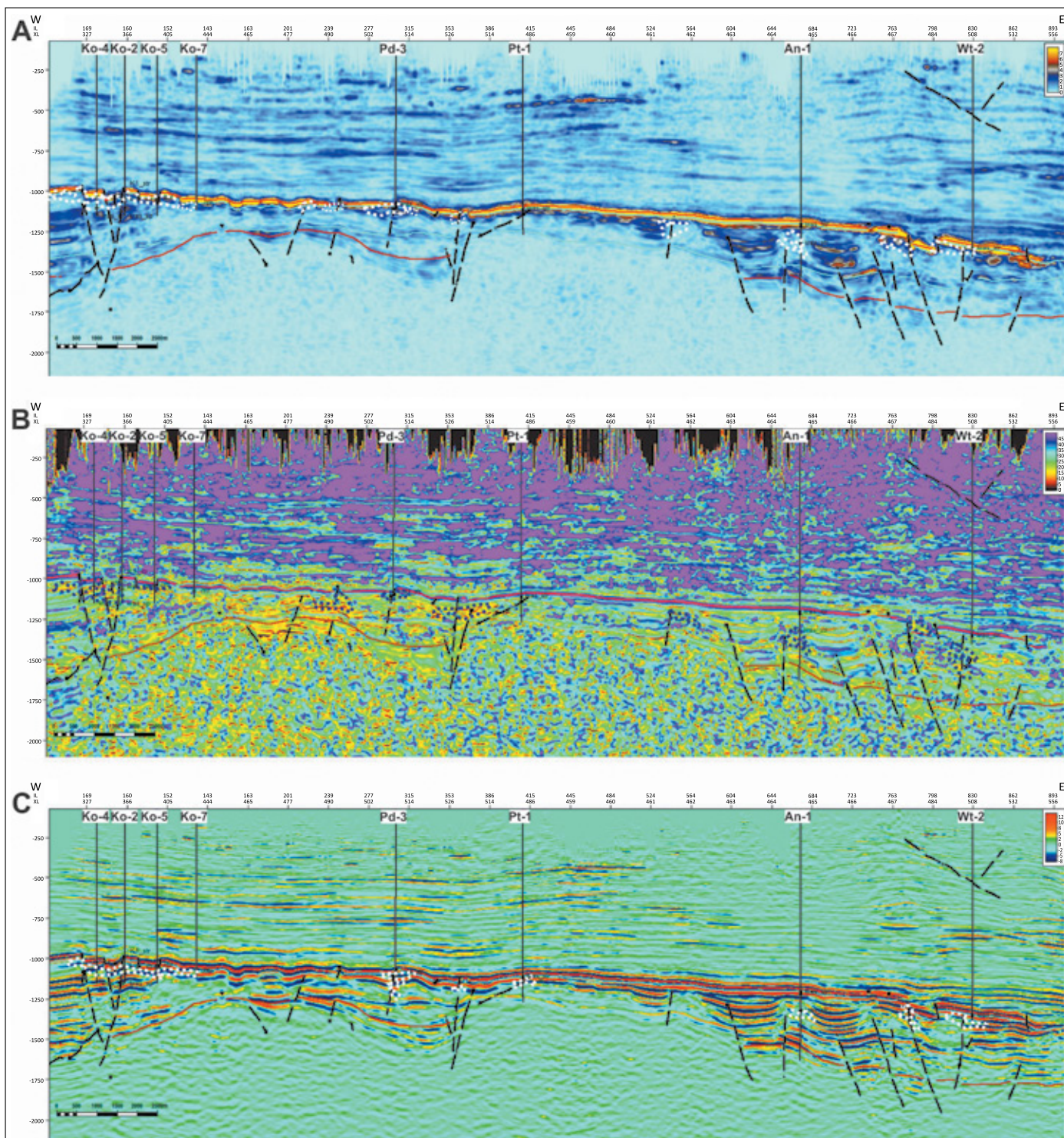
związany jest zarówno z obecnością stosunkowo głębokiej odnogi paleodoliny, jak i z licznymi dyslokacjami rozwiniętymi w utworach węglanowych. Rozmieszczenie przestrzenne stref, które mogą być utożsamiane z rozwojem struktur krasowych, wyraźnie koreluje z przebiegiem powierzchni uskokowych (rysunki 9 i 11).

Zaobserwowano, że poszczególne strefy w obszarze analizowanego zdjęcia sejsmicznego cechuje dosyć niejednorodny charakter zapisu atrybutowego. Wśród wielu możliwych przyczyn wskazać należy przede wszystkim obecność utworów ewaporatowych (głównie anhydrytów i gipsów) usytuowanych w bliskiej odległości od stropu kompleksu J3+K1, jak również wpływ reaktywowanych dyslokacji, przecinających utwory ewaporatowe. Niewielka miąższość utworów klastycznych badenu zalegających pomiędzy serią ewaporatową a stropem analizowanego kompleksu węglanowego w połączeniu ze zbyt małą rozdzielczością danych sejsmicznych w tym interwale powoduje, że anomalny zapis sejsmiczny związany z serią ewaporatową sięga aż po stropową partię jury, skutecznie maskując jej rzeczywisty zapis. Wspomniany wpływ zalegających w nadkładzie utworów ewaporatowych na uzyskany dla stropowej partii kompleksu J3+K1 obraz atrybutu *RMS Amplitude* widoczny jest na rysunku 12 w postaci anomalnie wysokich wartości tego atrybutu. Jedynie w skrajnie zachodniej części analizowanego obszaru, w której obrębie sieć dyslokacji jest



Rysunek 5. Przykład interpretacji pomiaru sondą akustyczną CAST w otworze Pt-1: komora krasowa w interwale 1489,5–1494,5 m z wypełnieniem drobnoziarnistym matriksu oraz brekcją wapienną

Figure 5. Example of interpretation of the CAST acoustic probe measurement in the Pt-1 well: karst chamber in the interval 1489.5–1494.5 m with a fine-grained matrix filling and carbonate breccia



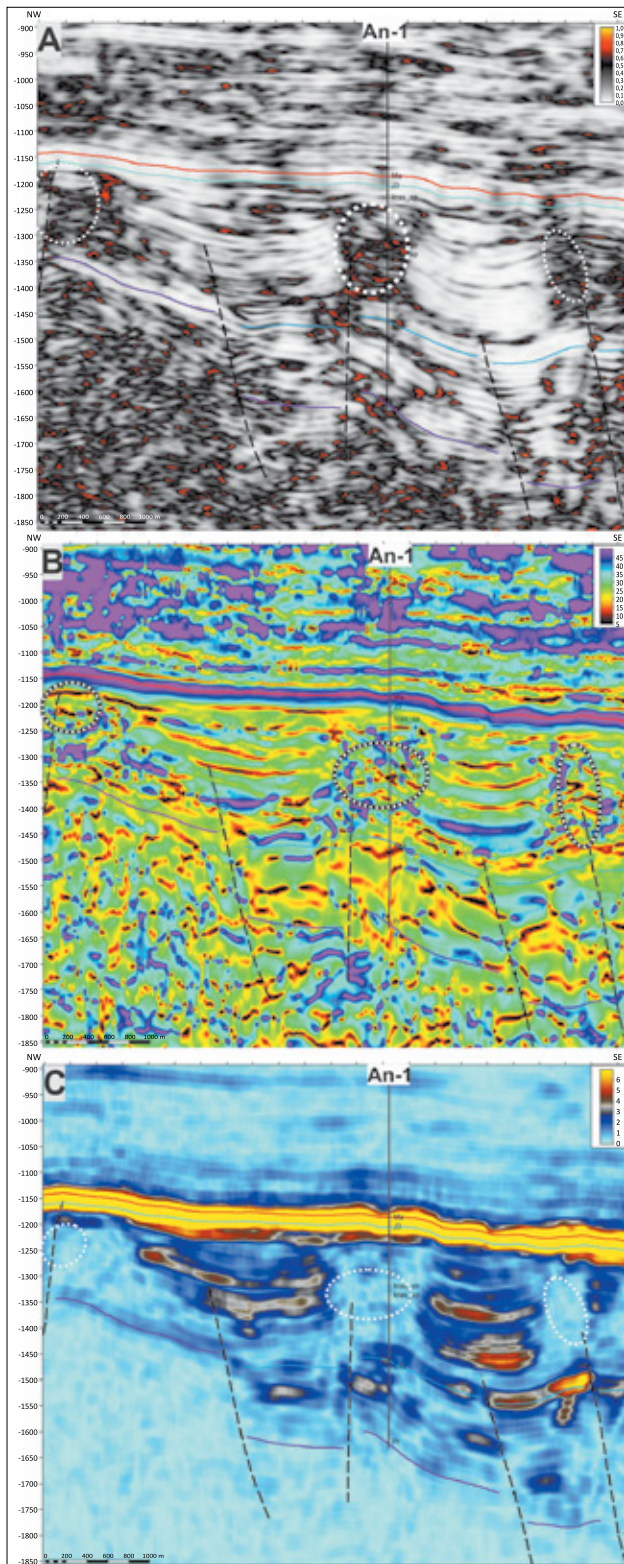
Rysunek 6. Przekrój sejsmiczny A1 w wersjach atrybutów objętościowych: A) *RMS Amplitude*, B) *Instantaneous Frequency*, C) *Relative Acoustic Impedance*; liniami przerywanymi zaznaczono potencjalne strefy rozwoju paleokrasu

Figure 6. Seismic section A1 in attribute versions: (A) *RMS Amplitude*, (B) *Instantaneous Frequency*, (C) *Relative Acoustic Impedance*; the dashed lines indicate potential zones of paleokarst

znacznie gęstsza, jak również w kilku izolowanych strefach (jak np. w rejonie otworu Pd-3) wartości *RMS Amplitude* są wyraźnie obniżone.

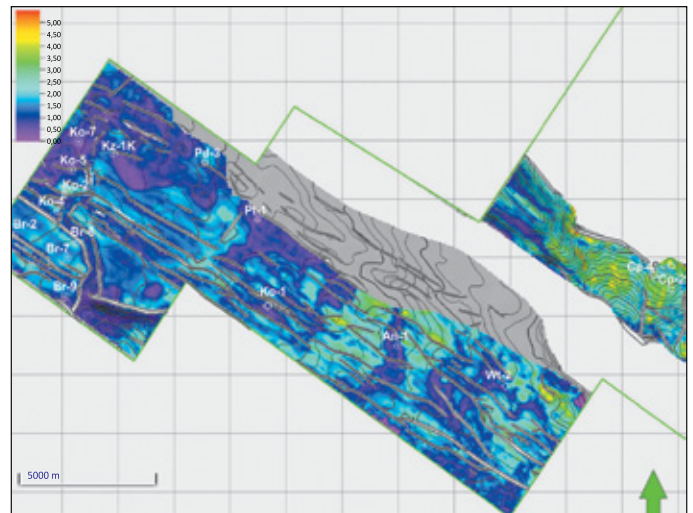
Próby wyekstrahowania stref charakteryzujących się obniżonymi wartościami częstotliwości chwilowej wykonano w rejonie otworów Ko-4 i Ko-2 przy wykorzystaniu modułu

Geobody interpretation. Obliczenia wykonano w interwale od powierzchni horyzontu J3-K1_str do czasu -50 ms poniżej tej powierzchni. Wynik rozprzestrzenienia wydzielonej strefy, którą można powiązać z rozwojem paleokrasu, przedstawiono na rysunku 13 na tle profili sejsmicznych w wersji atrybutu *RMS Amplitude*.



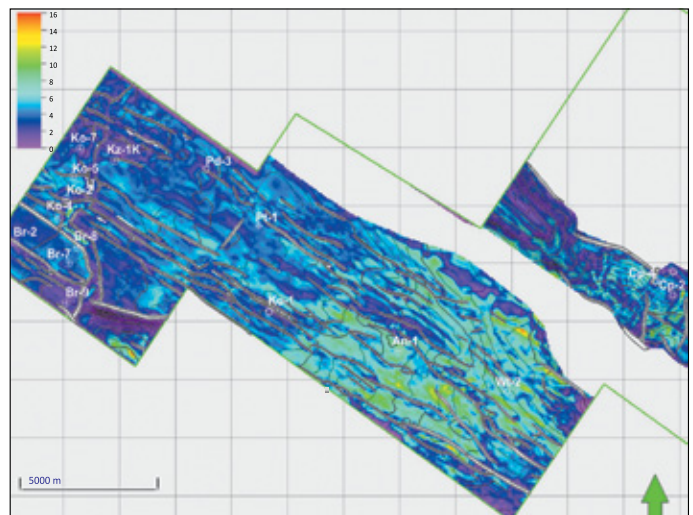
Rysunek 7. Przekrój sejsmiczny T468 w rejonie otworu An-1 w wersjach atrybutów: A) *Chaos*, B) *Instantaneous Frequency*, C) *RMS Amplitude*; elipsami zaznaczono potencjalne strefy o lepszych właściwościach zbiornikowych, powiązane z występowaniem budowli organicznych i stref uskokowych

Figure 7. Seismic section T468 (the An-1 well area) in attribute versions: (A) *Chaos*, (B) *Instantaneous Frequency*, (C) *RMS Amplitude*; ellipses indicate potential zones with improved reservoir properties related to the occurrence of organic buildups and fault zones



Rysunek 8. Atrybut powierzchniowy *RMS Amplitude* obliczony w bramce od -50 ms do -150 ms względem powierzchni J3-K1_str

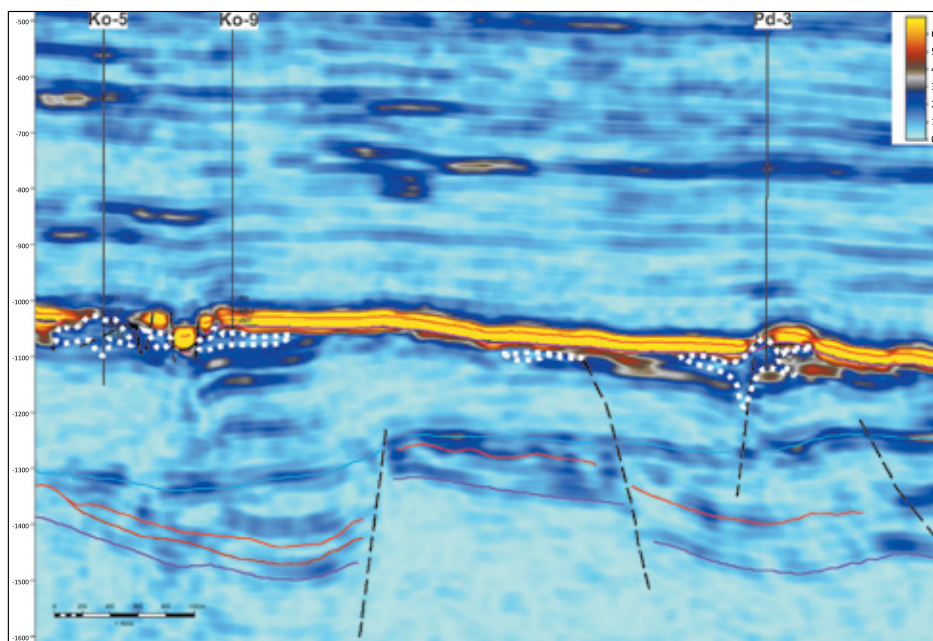
Figure 8. Surface attribute *RMS Amplitude* calculated in the gate from -50 ms to -150 ms in relation to the J3-K1_str surface



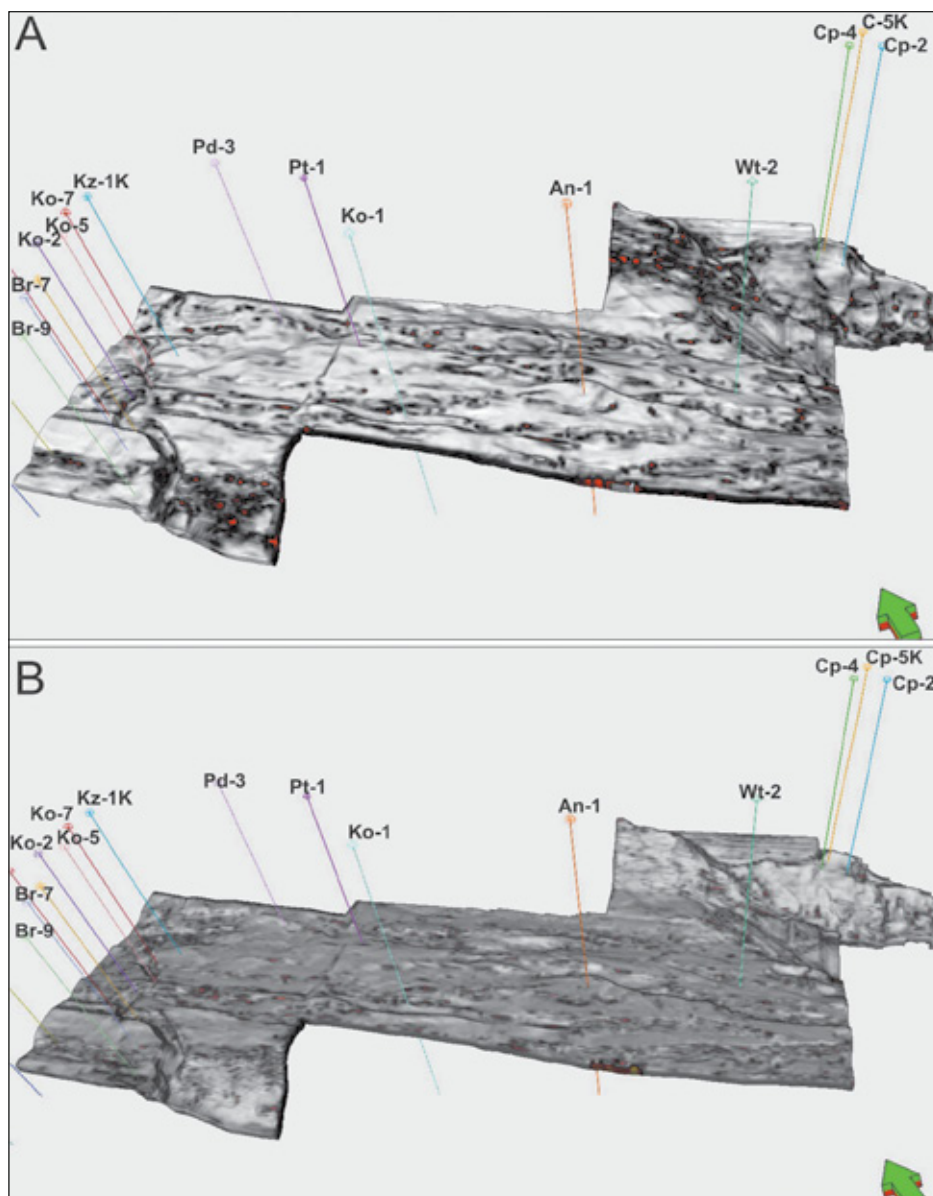
Rysunek 9. Atrybut powierzchniowy *RMS Amplitude* obliczony w bramce od -30 ms do powierzchni J3-K1_str

Figure 9. Surface attribute *RMS Amplitude* calculated in the gate from -30 ms to the J3-K1_str surface

Prezentowana wizualizacja 3D potwierdza wcześniejsze spostrzeżenia, że w strefach reaktywowanych uskoku, które przecinają utwory serii ewaporatowej, rozpatrywane atrybuty cechują się większą wiarygodnością w kontekście analizy rozwoju paleokrasu w partii przystropowej analizowanego kompleksu węglanowego. Jednak nie we wszystkich przypadkach uzyskano całkowitą zgodność interpretacji danych otworowych i sejsmicznych, czego przykładem może być otwór Ko-4, w którym wyinterpretowany na podstawie danych otworowych interwał rozwoju paleokrasu, zlokalizowany w nieco głębszej partii analizowanego kompleksu J3+K1, nie znajduje potwierdzenia w obrazie atrybutów sejsmicznych (rysunek 13).

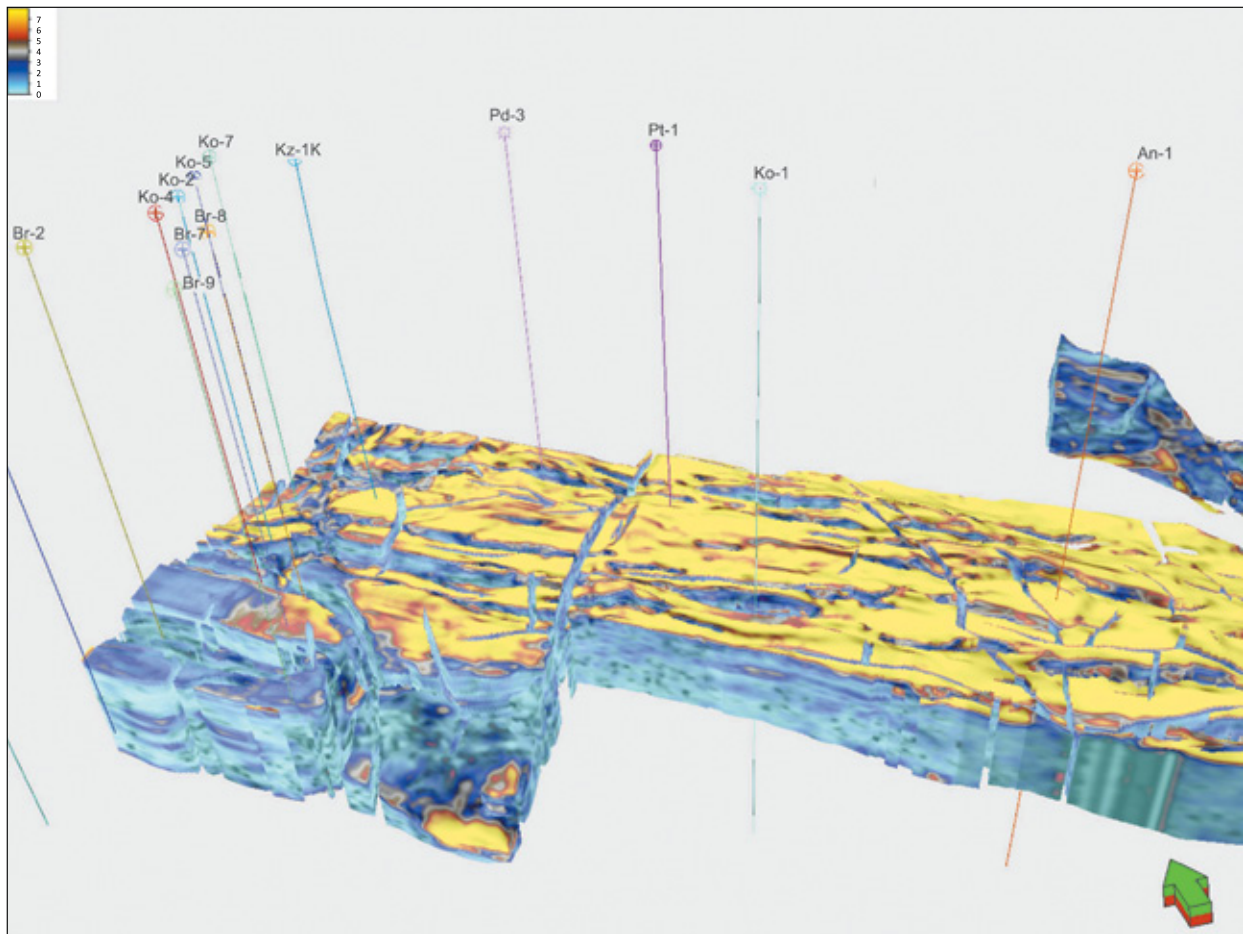


Rysunek 10. Przekrój sejsmiczny A2 w wersji atrybutu *RMS Amplitude*, liniami przerywanymi zaznaczono potencjalne strefy rozwoju paleokarstu
Figure 10. Seismic section A2 in RMS Amplitude version; dashed lines indicate potential zones of paleokarst



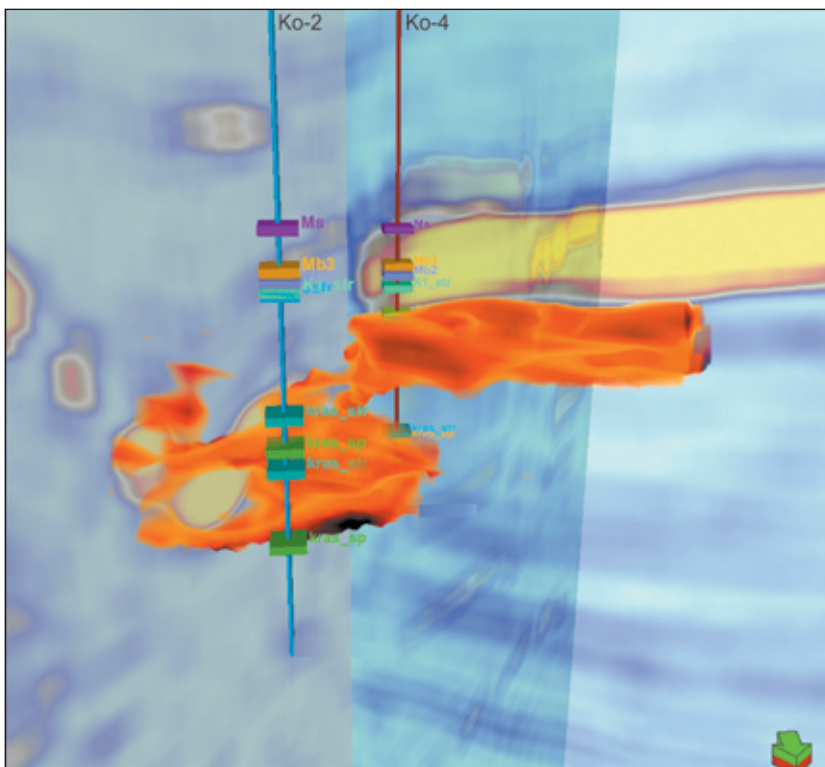
Rysunek 11. *Horizon probe* obliczony w bramce od powierzchni J3-K1_str do -80 ms: A) *Variance* i *Structural Smoothing*, B) *Chaos* i *Amplitude Contrast*

Figure 11. *Horizon probe* calculated in the gate from J3-K1_str surface to -80 ms: A) *Variance* and *Structural smoothing*, B) *Chaos* and *Amplitude Contrast*



Rysunek 12. Horizon probe obliczony od powierzchni J3-K1_str do powierzchni Jsp (spąg jury) dla połączonych atrybutów RMS Amplitude i Variance

Figure 12. Horizon probe calculated in the gate from J3-K1_str surface to Jsp surface (base of Jurassic) for mixed RMS Amplitude and Variance attributes



Rysunek 13. Horizon probe z wyekstrahowanymi najniższymi wartościami atrybutu Instantaneous Frequency na tle linii sejsmicznych L170 i T330 w wersji atrybutu RMS Amplitude

Figure 13. Horizon probe with extracted lowest values of Instantaneous frequency attribute on the background of L170 and T330 seismic sections in the RMS Amplitude attribute version

Dyskusja wyników

Przeprowadzona analiza danych geologicznych i wiertniczych, profilowań geofizyki otworowej oraz interpretacja materiałów sejsmicznych 3D pozwoliły na udokumentowanie stref rozwoju form paleokrasu w badanym obszarze przedgórze Karpat. Spośród wszystkich przeanalizowanych materiałów bardzo istotne okazały się obrazy ścian otworów, uzyskane w wyniku pomiarów sondami XRF i CAST, gdyż dostarczyły one bezpośrednich dowodów na obecność i wielkość form krasowych występujących w analizowanych utworach. Ze względu na ograniczoną objętość niniejszego artykułu autorzy planują przygotować odrębną publikację poświęconą wynikom interpretacji tych właśnie materiałów.

W trakcie analizy danych sejsmicznych spośród wielu przeanalizowanych atrybutów do interpretacji stref rozwoju paleokrasu najbardziej przydatne okazały się następujące: *Instantaneous Frequency*, *RMS Amplitude*, *Relative Acoustic Impedance* oraz *Variance*. Ponadto w niektórych strefach interesujące wyniki uzyskano również na podstawie analizy atrybutów *Chaos* i *Amplitude Contrast*.

Największym problemem w trakcie interpretacji okazała się zbyt mała rozdzielczość danych sejsmicznych, w tym szczególnie obecność szerokiej strefy anomalnego zapisu związanej z utworami serii ewaporatowej (anhydrytami), zalegającej w spągowej partii profilu utworów miocenu. Niewielka miąższość (najczęściej rzędu kilkunastu metrów) utworów klastycznych badanu zalegających pomiędzy serią ewaporatową a stropem analizowanego kompleksu węglanowego w połączeniu ze zbyt małą rozdzielczością danych sejsmicznych w tym interwale powoduje, że wspomniany anomalny zapis sejsmiczny pochodzący od ewaporatów sięga aż po stropową partię jury, skutecznie maskując jej rzeczywisty zapis. W związku z tym faktyczny obraz pochodzący bezpośrednio od przystropowej partii analizowanego kompleksu węglanowego jury i dolnej kredy może być interpretowany jedynie lokalnie, np. w strefach reaktywowanych uskoków przecinających serię ewaporatową (jak w rejonie otworu Pd-3 – rysunki 10, 12).

Na podstawie przeprowadzonej analizy obrazu sejsmicznego w odtworzeniu różnych atrybutów stwierdzono, że poszczególne rejony cechuje dosyć niejednorodny charakter zapisu atrybutowego, który w różnym stopniu zgodny jest z interpretacją przeprowadzoną na podstawie danych otworowych. Najlepszą korelację uzyskano dla rejonu otworu Pd-3, w którym stwierdzono całkowitą zgodność zapisu wszystkich analizowanych atrybutów sejsmicznych z interpretacją danych otworowych. Interesujące wyniki otrzymano także dla północno-zachodniej części analizowanego zdjęcia sejsmicznego, cechującej się największym stopniem rozpoznania wiertniczego (jednak wszystkie otwory zlokalizowane w tej strefie to otwory

stosunkowo płytkie, nieprzewiercające utworów jury). W rejonie tym lokalnie występujące strefy o obniżonych wartościach atrybutów *RMS Amplitude* oraz *Relative Acoustic Impedance* dosyć dobrze korelują z wyznaczonymi na podstawie danych otworowych interwałami rozwoju paleokrasu. Warto jednak zwrócić uwagę, że w sąsiedztwie otworu Ko-4 tylko wyższy z wydzielonych interwałów paleokrasu zapisuje się na sejsmicie w sposób charakterystyczny i możliwy do identyfikacji.

Z kolei w rejonie otworu An-1 interwał paleokrasu wyróżniony w stropowej partii kompleksu węglanowego jest zupełnie niedostrzegalny w obrazie sejsmicznym, co wiązać można najprawdopodobniej ze wspomnianym wyżej wpływem anomalnego zapisu sejsmicznego pochodzącego od utworów anhydrytowych. Jednak niższa z wyróżnionych stref paleokrasu w tym otworze dosyć dobrze zaznacza się w zapisie atrybutowym. Mechanizmy prowadzące do rozwoju tej strefy były z pewnością różne od tych, które są odpowiedzialne za rozwój paleokrasu w strefie przypowierzchniowej kompleksu jurajsko-dolnokredowego, gdyż wiązać je można głównie z oddziaływaniem wód głębszych, prowadzącym do rozpuszczania skał węglanowych w obrębie budowli organicznej o charakterze biohermowym. Duży udział procesów rozpuszczania pod wpływem oddziaływania roztworów, zachodzący już w zlitfikowanych skałach na etapie diagenety – lub raczej epigenety, prowadził do selektywnego rozpuszczania niektórych partii biolitytów, w wyniku czego w obrębie budowli utworzyły się puste przestrzenie, wypełnione wodami złożowymi. Obecność podobnego typu kawern w górnourajskich budowlach organicznych notowano również w innych rejonach przedgórze Karpat (*vide* Urbaniec et al., 2012; Urbaniec, 2021).

Należy podkreślić, że zróżnicowany zapis sejsmiczny w strefach rozwoju paleokrasu w obszarze badań związany jest nie tylko bezpośrednio z rozdzielczością danych sejsmicznych, ale z pewnością także z wielkością samych struktur paleokrasu. W porównaniu ze znanymi z literatury przykładami potężnych systemów krasowych z obszaru Chin (Tian et al., 2014; Dai et al., 2017; Xu et al., 2017; Gao et al., 2018; Gao et al., 2020; Lu et al., 2020; Ukar et al., 2020), Brazylii (Basso et al., 2018), Kanady (Dembicki i Machel, 1996; Huebscher i Machel, 1997) czy USA (Black, 2012; Moser, 2016) analizowany w ramach niniejszego opracowania system rozwinięty w utworach jury i dolnej kredy charakteryzuje się zdecydowanie mniejszymi rozmiarami. Dlatego też w obrazie sejsmicznym widoczne są przede wszystkim większe strefy rozwoju paleokrasu, usytuowane np. w otoczeniu paleodolin (północno-zachodnia część analizowanego zdjęcia 3D) czy też w strefach dyslokacji (rejon otworu Pd-3), gdzie infiltracja wód słodkich w skały węglanowe była znacznie ułatwiona i z pewnością miała szerszy zasięg niż w obszarach sąsiednich.

Wnioski

1. Interpretacja danych otworowych i sejsmicznych wykazała obecność rozległej powierzchni paleokrasu w stropowej partii kompleksu węglanowego górnej jury – dolnej kredy w centralnej części przedgórze Karpat, powstałej w wyniku infiltracji wód słodkich lub wysłodzonych.
2. W otoczeniu paleodolin (tj. głównie w NW części analizowanego zdjęcia sejsmicznego) oraz w bezpośrednim sąsiedztwie dyslokacji struktury krasowe są większe i bardziej rozbudowane, co świadczy o znacznie większej intensywności procesów rozpuszczania zachodzących w tych strefach.
3. Obecność elementów paleokrasu udokumentowano także w głębszych partiach wspomnianego kompleksu węglanowego (np. w strefie otworu An-1), gdzie stwierdzono obecność kawern i pustek, powstałych w wyniku selektywnego rozpuszczania skał węglanowych pod wpływem oddziaływania roztworów związanych z wodami wglębnymi. Zjawiska te zachodziły najczęściej w strefach występowania górnourajskich budowli organicznych.
4. Charakter zapisu sejsmicznego związany z elementami paleokrasu w poszczególnych rejonach analizowanego zdjęcia sejsmicznego jest wyraźnie zróżnicowany, co najprawdopodobniej związane jest z różnymi czynnikami, takimi jak zróżnicowana miąższość strefy rozwoju paleokrasu, rozdzielczość sejsmiki czy też wpływ zapisu anomalnego związanego z obecnymi w nadkładzie utworami ewaporatowymi.
5. Największą zgodność pomiędzy interpretacją danych otworowych a obrazem sejsmicznym uzyskano w północno-zachodniej części interpretowanego zdjęcia sejsmicznego, w której wyraźnie zaznaczają się strefy rozwoju paleokrasu występujące zarówno w otoczeniu paleodolin, jak i związane z dyslokacjami.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Możliwości identyfikacji struktur paleokrasu w utworach jury przedgórze Karpat w kontekście prac poszukiwawczych*, praca INiG – PIB, nr zlecenia 0104/KP/2021, nr archiwalny DK-4100-0092/2021.

Literatura

Aboaba O., Liner C., 2021. Characterization of paleokarst Mississippian chat and tripolite zones in Osage County, Oklahoma, USA. *SEG/AAPG/SEPM First International Meeting for Applied Geoscience & Energy, Denver, Colorado, USA and online, September 2021*. DOI: 10.1190/segam2021-3592989.1.

Alexandrowicz S.W., Garlicki A., Rutkowski J., 1982. Podstawowe jednostki litostratygraficzne miocenu zapadliska przedkarpacciego. *Kwartalnik Geologiczny*, 26(2): 470–471.

Basso M., Kuroda M.C., Afonso L.C.S., Vidal A.C., 2018. Three-dimensional seismic geomorphology of paleokarst in the cretaceous MACAÉ group carbonates, Campos Basin, Brazil. *Journal of Petroleum Geology*, 41(4): 513–526.

Becker A., Nawrocki J., 2007. Buntsandstein. [W:] Szulc J., Becker A. (red.). International workshop on the Triassic of Southern Poland, September 3–8, 2007. *Fieldtrip guide. Inst. Geol. Sci., Jagiell. Univ., Cracow*: 7–16.

Black T.J., 2012. Deep karst system research, Michigan, USA. *Carbonates and Evaporites*, 27: 119–122. DOI: 10.1007/s13146-012-0093-6.

Bobrek L., Świetlik B., Urbaniec A., 2000. Zespoły faunistyczne bioherm późnourajskich środkowej części przedgórze polskich Karpat. *XVII Konferencja Paleontologów „Historia basenów sedimentacyjnych a zapis paleontologiczny”, Kraków 21–23.09.2000. Materiały konferencyjne*: 18–20.

Buła Z., Habryn R. (red.), 2008. Atlas geologiczno-strukturalny paleozoicznego podłoża Karpat zewnętrznych i zapadliska przedkarpacciego 1:300 000. *Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa*.

Carrillat A., Hunt D., Randen T., Sonneland L., Elvebakk G., 2005. Automated mapping of carbonate build-ups and palaeokarst from the Norwegian Barents Sea using 3D seismic texture attributes. [W:] Doré A.G., Vining B.A. (eds.). *Petroleum Geology: North-West Europe and Global Perspectives. Proceedings of the 6th Petroleum Geology Conference, Geological Society, London*, 1595–1611. DOI: 10.1144/0061595.

Castillo M.V., Mann P., 2006. Deeply buried, Early Cretaceous paleokarst terrane, southern Maracaibo Basin, Venezuela. *AAPG Bulletin*, 90(4): 567–579. DOI: 10.1306/10120505034.

Dai X., Zhang M., Jiang Q., Feng Z., 2017. Karst reservoirs seismic prediction of Lower Permian Maokou Formation in central Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 44(1): 79–88. DOI: 10.1016/S1876-3804(17)30010-1.

Dembicki E.A., Machel H.G., 1996. Recognition and delineation of paleokarst zones by the use of wireline logs in the bitumen-saturated Upper Devonian Grosmont Formation of Northeastern Alberta, Canada. *AAPG Bulletin*, 80(5): 695–712.

Ding Z., Wang R., Chen F., Yang J., Zhu Z., Yang Z., Sun X., Xian B., Li E., Shi T., Zuo Ch., Li Y., 2020. Origin, hydrocarbon accumulation and oil-gas enrichment of fault-karst carbonate reservoirs: A case study of Ordovician carbonate reservoirs in South Tahe area of Halahatang oilfield, Tarim Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 47(2): 306–317. DOI: 10.1016/S1876-3804(20)60048-9.

Dubois P., Sorriaux P., Soudet H.J., 1993. Rospo Mare (Adriatique): Un paléokarst pétrolier du domaine méditerranéen. *Karstologia*, 21: 31–42.

Fournillon A., Bellentani G., Moccia A., Jumeaucourt C., Terdich P., Siliprandi F., Peruzzo F., 2017. Characterization of a Paleokarstic Oil Field (Rospo Mare, Italy): Sedimentologic and Diagenetic Outcomes, and Their Integration in Reservoir Simulation. [W:] Renard P., Bertrand C. (eds.). *EuroKarst 2016, Neuchâtel. Advances in the Hydrogeology of Karst and Carbonate Reservoir. Springer, Cham*. DOI: 10.1007/978-3-319-45465-8_5.

Gao B., Tian F., Pan R., Zheng W., Li R., Huang T., Liu Y., 2020. Hydrothermal Dolomite Paleokarst Reservoir Development in Wolonghe Gasfield, Sichuan Basin, Revealed by Seismic Characterization. *Water*, 12(2): 579. DOI: 10.3390/w12020579.

Gao D., Lin C., Hu M., Yang H., Huang L., 2018. Paleokarst of the Lianglitage Formation related to tectonic unconformity at the top of the Ordovician in the eastern Tazhong Uplift, Tarim Basin, NW China. *Geological Journal*, 53(2): 458–474. DOI: 10.1002/gj.2902.

Gliniak P., Gutowski J., Urbaniec A., 2005. Budowle organiczne w utworach górnej jury przedgórze Karpat – aktualny stan rozpoznania na podstawie interpretacji materiałów sejsmicznych i wiertniczych w kontekście poszukiwań złóż węglowodorów. *Tomy Jurajskie*, 3: 29–43.

- Gliniak P., Laskowicz R., Urbaniec A., 2000. Górnojurajskie budowle organiczne w rejonie Kraków–Dębica. Możliwości identyfikacji z zapisu sejsmicznego oraz perspektywy poszukiwawcze dla złóż węglowodorów. *Prace Instytutu Górniczego i Gazownictwa*, 110: 161–165.
- Głowacki E., Senkowiczowa H., 1969. Uwagi o rozwoju triasu na obszarze południowo-wschodniej Polski. *Kwartalnik Geologiczny*, 13(2): 338–356.
- 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.
- Huebscher H., Machel H.G., 1997. Paleokarst in the Grosmont Formation, Northeastern Alberta, Canada. *CSPG-SEPM Joint Convention, CSPG Special Publications*: 129–152.
- Jawor E., 1983. Utwory miocenu między Krakowem a Dębicą. *Przegląd Geologiczny*, 31(12): 635–640.
- Karnkowski P.H., Ozimkowski W., 2001. Ewolucja strukturalna podłoża miocenijskiego basenu przedkarpackiego (obszar pomiędzy Krakowem a Przemyślem). *Przegląd Geologiczny*, 49(5): 431–436.
- Li Y., Hou J., Sun J., Kang Z., Liu Y., Song S., Han D., 2018. Paleokarst reservoir features and their influence on production in the Tahe Oilfield, Tarim basin, China. *Carbonates and Evaporites*, 33: 705–716. DOI: 10.1007/s13146-017-0401-2.
- Lønøy B., 2021. Paleokarst reservoir modelling – A concept-driven approach. *Dissertation for the degree Philosophiae Doctor (PhD), Kommunikasjon / University of Bergen*.
- Lu X., Wang Y., Yang D., Wang X., 2020. Characterization of paleokarst reservoir and faulted karst reservoir in Tahe Oilfield, Tarim Basin, China. *Advances in Geo-Energy Research*, 4(3): 339–348. DOI: 10.46690/ager.2020.03.11.
- Matyja B.A., 2009. Development of the Mid-Polish Trough versus Late Jurassic evolution in the Carpathian Foredeep area. *Geological Quarterly*, 53(1): 49–62.
- Matyja B.A., Barski M., 2007. Stratygrafia górnej jury podłoża zapadliska przedkarpackiego. *Tomy Jurajskie*, 4: 39–50.
- Miziołek M., Filar B., 2019. Paleokarst w utworach górnej jury podłoża zapadliska przedkarpackiego i jego znaczenie złożowe. *Nafta-Gaz*, 75(6): 330–344. DOI: 10.18668/NG.2019.06.04.
- Moryc W., 1992. Budowa geologiczna utworów podłoża miocenu w rejonie Sędziszów Małopolski – Rzeszów i ich perspektywiczność. *Nafta-Gaz*, 48(9-10): 205–223.
- Moryc W., 1996. Budowa geologiczna podłoża miocenu w rejonie Pilzno–Dębica–Sędziszów Małopolski. *Nafta-Gaz*, 52(12): 521–550.
- Morycowa E., Moryc W., 1976. Rozwój utworów jurajskich na przedgórzu Karpat w rejonie Dąbrowy Tarnowskiej–Szczucina. *Rocznik Polskiego Towarzystwa Geologicznego*, 46(1–2): 231–288.
- Moser D.J., 2016. 3D Seismic interpretation of paleokarst sinkholes, Boone Limestone, Lower Mississippian: subsurface Eastern Arkoma Basin, Conway County, Arkansas. *Theses and Dissertations, University of Arkansas, Fayetteville*, 1727. <<http://scholarworks.uark.edu/etd/1727>>.
- Navarro J., 2019. Casablanca: Spain's Biggest Oil Field. *Explorer AAPG*, 9: 20–23.
- Połtowicz S., 1998. Dolnosarmacka delta Szczurowej na tle ewolucji geologicznej przedgórza Karpat. *Geologia (Kwartalnik AGH)*, 24(3): 219–239.
- Połtowicz S., 1999. Badeńskie olistostromy i stożki turbidytowe okolic Tarnowa (przedgórze Karpat Środkowych). *Geologia (Kwartalnik AGH)*, 25(2): 153–187.
- Rodríguez-Morillas N., Playá E., Travé A., Martín-Martín J.D., 2013. Diagenetic processes in a partially dolomitized carbonate reservoir: Casablanca Oil Field, Mediterranean Sea, offshore Spain. *Geologica Acta*, 11(2): 195–214. DOI: 10.1344/105.000001839.
- Skvortsov A., Kuleshov V., Ajiboye M., Agafonova O., 2014. An Approach to Tight Paleokarst Zones Identification Based on Integrated Use of 3D Seismic Surveys, Core and Well-Log Data and Implication to Reservoir Quality. *SPE Russian Oil and Gas Exploration & Production Technical Conference and Exhibition, Moscow, Russia, October 2014*. DOI: 10.2118/171210-MS.
- Soudet H.J., Sorriaux P., Rolando J.P., 1994. Relationship between fractures and karstification. The oil bearing paleokarst of Rospo Mare (Italy). *Bulletin Des Centres de Recherches Exploration-Production Elf Aquitaine*, 18(5): 257–297.
- Szyperko-Teller A., Moryc W., 1988. Rozwój basenu sedymentacyjnego pstręgo piaskowca na obszarze Polski. *Kwartalnik Geologiczny*, 32(1): 53–72.
- Świetlik B., Urbaniec A., Hejnar J., Bobrek L., 2011. Nowe odkrycie tytońskich tintinnidów w rejonie Sędziszowa Małopolskiego. *Jurassica IX, Małogoszcz 06–08.09.2011, Materiały konferencyjne*: 7–26.
- Tang S., Tang D., Li S., Geng Y., Xu H., Tao S., Ma L., Zhu X., 2018. Geochemical characteristics and origin of natural gas and gas-filling mode of the Paleozoic in the Yanchuannan gas field, Ordos Basin, China. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 49: 286–297. DOI: 10.1016/j.jngse.2017.11.013.
- Tian F., Jin Q., Li Y., Zhang H., Kang X., 2014. Visualization and Quantification of Deeply Buried Paleokarst Reservoirs in Tahe Oilfield, Tarim Basin, China. *Search and Discovery Article #20257; adapted from poster presentation given at 2014 AAPG Annual Convention and Exhibition, Houston, Texas, April 6–9, 2014*.
- Tian F., Lu X., Zheng S., Zhang H., Rong Y., Yang D., Liu N., 2017. Structure and Filling Characteristics of Paleokarst Reservoirs in the Northern Tarim Basin, Revealed by Outcrop, Core and Borehole Images. *Open Geosciences*, 9(1): 266–280. DOI: 10.1515/geo-2017-0022.
- Ukar E., Baqués V., Laubach S.E., Marrett R., 2020. The nature and origins of decametre-scale porosity in Ordovician carbonate rocks, Halahatang oilfield, Tarim Basin, China. *Journal of the Geological Society*, 177: 1074–1091. DOI: 10.1144/jgs2019-156.
- 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., 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., Kowalska-Skulik A., Nikiel-Tshabangu B., 2012. Budowle organiczne górnej jury przedgórza Karpat jako drogi migracji węglowodorów do pułapek mezozoicznych. *Wiadomości Naftowe i Gazownicze*, 12(176): 6–10.
- Xu X., Chen Q., Chu C., Li G., Li C., Shi Z., 2017. Tectonic evolution and paleokarstification of carbonate rocks in the Paleozoic Tarim Basin. *Carbonates and Evaporites*, 32: 487–496. DOI: 10.1007/s13146-016-0307-4.
- Yang P., Ren Z., Zhou R., Cui J., Qi K., Fu J., Li J., Liu X., Li W., Wang K., 2021. Tectonic evolution and controls on natural gas generation and accumulation in the Ordovician system of the Ordos Basin, North China. *Energy Reports*, 7: 6887–6898. DOI: 10.1016/j.egy.2021.10.066.
- Zhang B., Liu J., 2009. Classification and characteristics of karst reservoirs in China and related theories. *Petroleum Exploration and Development*, 36(1): 12–29.

Zhang Y., Tan F., Qu H., Zhong Z., Liu Y., Luo X., Wang Z., Qu F., 2017. Karst monadnock fine characterization and reservoir control analysis: A case from Ordovician weathering paleokarst reservoirs in Lungu area, Tarim Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 44(5): 758–769. DOI: 10.1016/S1876-3804(17)30086-1.

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.

Zou C., 2013. Carbonate Fracture-Cavity Reservoir. [W:] Zou C. (ed.). *Unconventional Petroleum Geology*, 191–221. *Wydawnictwo Elsevier*. DOI: 10.1016/B978-0-12-397162-3.00006-2.



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 Mariusz MIZIOŁEK
Starszy specjalista badawczo-techniczny
w Zakładzie Podziemnego Magazynowania Gazu
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: mariusz.miziolek@inig.pl



Mgr inż. Bogdan FILAR
Starszy specjalista badawczo-techniczny; kierownik
Zakładu Podziemnego Magazynowania Gazu
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: bogdan.filar@inig.pl



Inż. Kinga FILIPOWSKA-JEZIOREK
Główny specjalista inżynieryjno-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



Mgr Anna ŁABA-BIEL
Główny specjalista inżynieryjno-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

OFERTA BADAWCZA ZAKŁADU SEJSMIKI

- interpretacja strukturalna i litofacjalna danych sejsmicznych 2D i 3D;
- konstrukcja map powierzchniowych w domenie czasu i głębokości;
- budowa modeli prędkościowych w domenie czasu i głębokości na potrzeby konwersji czas-głębokość oraz migracji głębokościowej;
- obliczanie inwersji symultanicznej oraz stochastycznej na danych sejsmicznych;
- opracowanie i analiza map atrybutów sejsmicznych, inwersji sejsmicznej, dekompozycji spektralnej;
- prognozowanie ciśnień porowych na podstawie danych sejsmicznych i geofizycznych;
- przetwarzanie i interpretacja pionowych profilowań sejsmicznych PPS 1C/3C;
- interpretacja parametrów petrofizycznych w przestrzeni okotoworowej w oparciu o pomiary pionowego profilowania sejsmicznego (PPS);
- kompleksowa interpretacja geologiczno-złożowa na podstawie zintegrowanych danych geologicznych i geofizycznych (analiza cech makroskopowych rdzeni wiertniczych, objawy i wyniki prób złożowych w otworach, profilowania geofizyki otworowej, interpretacja sejsmiczna);
- szczegółowa interpretacja sejsmostratygraficzna i tektonostratygraficzna kompleksów skał klastycznych i węglanowych z wykorzystaniem metody stratygrafii sekwencji.

