

Krzysztof Sowizdzał, Tomasz Słoczyński, Irena Matyasik, Marek Stadtmüller

*Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

## Analiza paleozoicznego systemu naftowego w strefie brzeżnej nasunięcia Karpat fliszowych

Praca przedstawia wyniki analizy procesów generowania węglowodorów przez utwory dolnego paleozoiku zalegające pod nasuniętym orogেনem karpackim na obszarze pomiędzy Pilzнем i Rzeszowem. Ocenie poddano skalę generacji węglowodorów oraz jej czas w kontekście ewolucji strukturalnej obszaru badań. Opracowano przestrzenny model geologiczny, obejmujący budowę strukturalną obszaru badań oraz wykształcenie litologiczne poszczególnych wydzielen. Na podstawie wyników badań geochemicznych za potencjalne skały macierzyste uznano utwory ordowiku i syluru. Wykorzystując profilowania geofizyki otworowej, wykonano estymację zawartości TOC [% wag.] i porównano jej rezultat z wynikami oznaczeń laboratoryjnych. Dla przewierconych profili dolnego paleozoiku obliczono średnie zawartości TOC oraz sporządzono mapy początkowych (zrekonstruowanych) zawartości TOC<sub>0</sub> [%] i mapy początkowego potencjału węglowodorowego HI<sub>0</sub> [mg HC/g TOC]. Dynamicznemu modelowaniu poddano ewolucję strukturalną i termiczną obszaru badań oraz procesy generacji, ekspulsji i migracji węglowodorów. Wyniki przeprowadzonych symulacji procesów naftowych wykazały znaczną intensywność generacji i ekspulsji węglowodorów, największą w SE części obszaru, charakteryzującej się najwyższymi wartościami TOC i największym potencjałem genetycznym HI skał macierzystych. Jednoczesne znaczne pograżenie tej strefy skutkowało wysokim stopniem przeobrażenia materii organicznej, prowadzącym do generowania węglowodorów. W strefie tej prognozowano występowanie akumulacji węglowodorów w utworach węglanowych dewonu i karbonu oraz w klastycznych osadach kulmu. Największe spośród prognozowanych obiektów perspektywicznych zlokalizowane są w sąsiedztwie stref dyslokacyjnych, które prawdopodobnie stanowiły główne strefy migracji węglowodorów do pułapek złożowych. Jednym z istotnych wniosków płynących z przeprowadzonych prac symulacyjnych było wykazanie, że skala procesów generacji i ekspulsji węglowodorów w utworach ordowiku i syluru w przybliżeniu 10-krotnie przewyższa pojemność zbiornikową węglanowych utworów dewonu i karbonu oraz klastycznych osadów kulmu. Obserwowana zbieżność przebiegu stref dyslokacyjnych w utworach dolnego paleozoiku oraz w obrębie karpackiej formacji fliszowej, w połączeniu ze skalą i czasem generacji HC w utworach dolnopaleozoicznych, stanowi asumpt do rozpatrywania macierzystych formacji ordowiku i syluru jako potencjalnego źródła węglowodorów w utworach zbiornikowych karpackiej formacji fliszowej.

Słowa kluczowe: paleozoiczny system naftowy, generacja, ekspulsja, migracja, akumulacja węglowodorów, strefa brzeżna Karpat fliszowych.

### Analysis of Paleozoic petroleum system in the marginal zone of the Carpathian flysch overlap

The paper presents results of the analysis of petroleum generation processes within Lower Paleozoic formations underlying the thrust and folded Carpathian orogen in the area between Pilzno and Rzeszow. The scale of hydrocarbon generation and its timing was evaluated in the context of structural evolution of the study area. A 3D geological model was developed, including structural settings and spatial distribution of lithofacies and their properties. Based on geochemical laboratory measurements Ordovician and Silurian formations were recognized as potential source rocks. Using well logs data continuous TOC profiles were estimated by calibration with lab data. Initial TOC<sub>0</sub> and hydrocarbon potential HI<sub>0</sub> values were reconstructed and mapped. The dynamic modeling (4D) of petroleum systems was carried out including structural and thermal evolution of the study area and the processes of generation, expulsion and migration of hydrocarbons. The results of the simulation showed a significant intensity of petroleum generation and expulsion, the largest in the SE part of the area, which correlate with the highest organic matter content (TOC) and genetic potential (HI) of source rocks as well as the largest burial depth of source intervals resulting in a high

transformation of organic matter. Devonian and Carboniferous carbonate and clastic culm sediments are potential reservoir rocks where oil accumulations are forecasted. The largest predicted accumulations are located in the vicinity of major faults which were considered as open to flow for oil and gas in periods of geological time scale. One of the important lessons learned from the simulation of the work was to demonstrate that the scale of the processes of generation and expulsion of hydrocarbons in the Ordovician and Silurian works approximately 10 times exceed the capacity of the reservoir of carbonate Devonian and Carboniferous clastic culm sediments. The apparent convergence of major faults within Paleozoic formations and within the Carpathian flysch formations, together with the scale and timing of HC generation in Palaeozoic zones favor the Ordovician and Silurian formations as a potential source of hydrocarbons for reservoir intervals within the overlying Carpathian flysch formation.

Key words: Paleozoic petroleum system, generation, expulsion, migration, accumulation of hydrocarbons, marginal zone of Carpathians flysch.

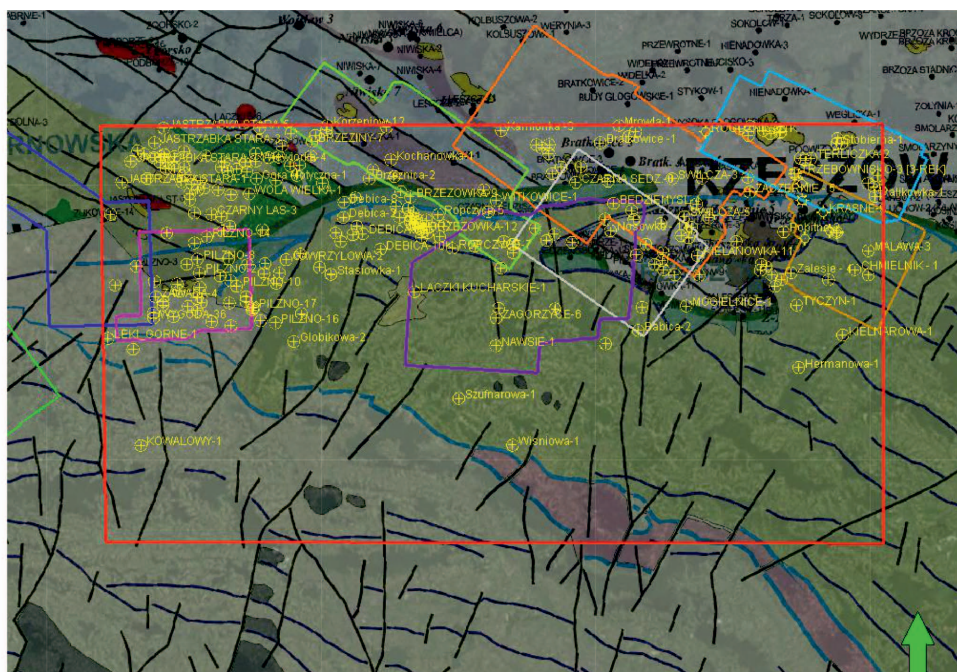
### Budowa geologiczna obszaru badań, model 3D

Strefa brzeżna nasunięcia utworów fliszowych stanowi od dziesięcioleci przedmiot intensywnej eksploracji naftowej, której celem są, w różnym stopniu, zarówno utwory górnego paleozoiku (karbon, dewon) z odkrytymi akumulacjami ropy naftowej i gazu ziemnego (Nosówka, Trzebownisko, Załęże), mezozoiczne utwory jurajskie i kredowe (m.in. złoża Tarnów, Łąka, Łapanów, Wierzchosławice, Góra Ropczycka), mułowcowo-piaskowcowe osady miocenu autochtonicznego i miocenu sfałdowanego (z licznymi udokumentowanymi złożami gazu ziemnego), jak i utwory karpackiej formacji fliszowej [8, 10, 13, 14].

Obszar objęty badaniami stanowi prostokąt o powierzchni około 2500 km<sup>2</sup> zlokalizowany (w przybliżeniu) pomiędzy południkami Pilzna i Rzeszowa oraz równoleżnikami Bratkowic i Strzyżowa (rysunek 1).

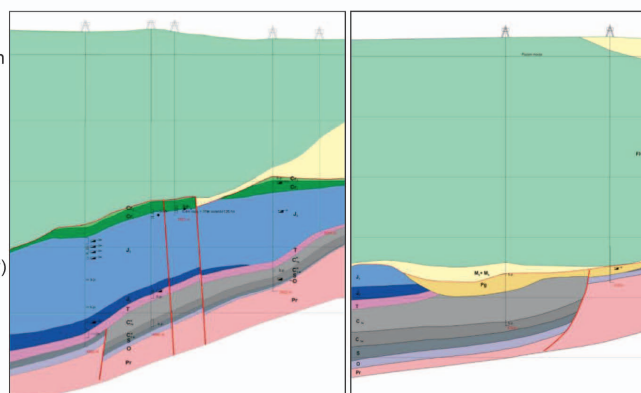
Profil geologiczny obszaru badań cechuje znaczna złożoność; obejmuje on utwory kilku kompleksów litologiczno-stratygraficznych: prekambryjskiego, paleozoicznego, mezozoicznego, miocenijskiego oraz nasunięte od południa utwory karpackiej formacji fliszowej.

Ogólną charakterystykę formacji geologicznych obecnych w profilu przedstawia się następująco:



Fl+M <sub>st</sub>	Nasunięcie karpacko-stebnickie
M	Miocen Zatoki Rzeszowskiej
M <sub>s+b</sub>	Miocen autochtoniczny sarmat+baden
Pg	Paleogen
Cr <sub>3</sub>	Kreda górna
Cr <sub>1</sub>	Kreda dolna
J <sub>3</sub>	Jura górna
J <sub>2</sub>	Jura środkowa
T	Trias
C <sub>1k</sub>	Karbon dolny wizen (kulm)
C <sub>1w</sub>	Karbon dolny wizen (wapień węglowy)
D <sub>2+3</sub>	Dewon górny i środkowy
D <sub>1</sub>	Dewon dolny
S	Sylur
O	Ordowik
Pr	Prekambry

uskoki



Rys. 1. Szkic lokalizacyjny opracowanego modelu systemu naftowego na tle fragmentu mapy geologicznej Karpat zewnętrznych (w części S i centralnej rejonu badań) [8] oraz fragmentu mapy podłoża utworów miocenijskich (w N części obszaru badań) autorstwa Piotra Gliniaka (materiały niepublikowane): zasięg modelu – czerwony poligon; otwory wiertnicze – kolor różowy; zasięg danych sejsmicznych 3D – żółte kontury. Poniżej fragmenty schematycznych przekrojów geologicznych przez rejon badań [17]

### **Prekambr**

Utwory prekambru występują na całym omawianym obszarze. W części północnej i wschodniej zalegają bezpośrednio pod utworami miocenu, a na południu pod utworami paleozoiku (od ordowiku po perm). Są to geosynkinalne, fliszowe, intensywnie sfałdowane i silnie zdiagenezowane łowce, mułowce, piaskowce, rzadziej żwirowce piaszczyste i zlepieńce, o upadach do  $60^{\circ}$ – $90^{\circ}$ , silnie spękane i zlustrowane, o słabym metamorfizmie, ze sporadycznie występującymi laminami kwarcytowymi [3].

### **Ordowik**

Osady wieku ordowickiego występują w południowej części analizowanego obszaru i zalegają niezgodnie na utworach prekambru. Zasięg północno-wschodni generalnie wyznacza regionalna dyslokacja zwana „wałnym uskokiem Trzciana–Mielec” [3]. Miąższość jest zmienna i waha się od kilku do ponad 300 m. Głębokość zalegania zmienia się od około –3000 m w północnej części obszaru do prawdopodobnie około –6000 m w części południowej. Są to klastyczne oraz węglanowe skały wieku od arenigu po aszgil [3, 14, 25].

### **Sylur**

Obszar występowania osadów sylurskich w znacznym stopniu pokrywa się z zasięgiem utworów ordowiku, na których zalegają one z luką stratygraficzną, ale bez widocznej niezgodności kątowej. Miąższość osadów sylurskich (wieku od dolnego landoweru do dolnego ludlowu) jest silnie zróżnicowana i wynosi od kilkunastu metrów w północnej części obszaru do ponad 180 m w części południowej. Głębokość zalegania waha się od około –3000 m w północnej części obszaru do przypuszczalnie ponad –5500 m w części południowej [11]. Ruchy tektoniczne fazy ardeńskiej, na przełomie syluru i dewonu, doprowadziły do deformacji tektonicznych osadów sylurskich i starszych oraz usunięcia znacznej części wczesnopaleozoicznej pokrywy osadowej [25].

### **Dewon**

Utwory dewońskie, zalegające na różnowiekowych skałach od prekambru po sylur, odznaczają się ograniczonym zasięgiem, zależnym od morfologii przeddewońskiego podłoża. Największe miąższości osiągają w obniżeniach podłoża, natomiast ich brak obserwuje się w elementach elewowanych. Dewon dolny jest wykształcony w postaci utworów terygeniczych, natomiast środkowy i górny tworzą utwory węglanowe. Strop dewonu zalega na różnych głębokościach: od około –2600 m w północno-wschodniej części obszaru (rejon Zalesia), poniżej –3100 m w rejonie Tyczyna i –4090 m w SE części obszaru badań [3]. Miąższości są zróżnicowane: w strefie wychodni warstw wynoszą od kilku do kilkunastu metrów, natomiast

w strefach synklijalnych dochodzą do kilkuset metrów. Południowy zasięg utworów dewonu nie jest znany.

### **Utwory karbonu**

Występowanie utworów karbonu generalnie pokrywa się z zasięgiem utworów dewońskich, lecz zdania badaczy na temat ciągłości sedymentacyjnej pomiędzy dewonem a karbonem są podzielone. Zając w swoich pracach [27, 28] przedstawia przesłanki świadczące o ciągłości sedymentacyjnej, natomiast Moryc [19, 20] uważa, że znaczna część utworów dewońskich, w wyniku ruchów bretońskich, została zerodowana.

Utwory karbonu w obszarze badań wykształcone są w trzech kompleksach litologicznych: terygeniczo-węglanowym (turnej), węglanowym (wizen) i terygenicznym – kulkim (wizen wyższy + namur); brak jest osadów górnokarbońskich [3].

Strop karbonu zalega na głębokości od około –1600 m w północno-zachodniej części obszaru do poniżej –4400 m na południu. Jego miąższość ze względu na erozję pokarbońską jest dość zróżnicowana i wynosi od kilku metrów na granicy wychodni karbonu do ponad 700 m na południu analizowanego obszaru, w rejonie Czudca, przy czym średnio miąższości karbonu przyjmują wartości pomiędzy 200 m a 300 m.

Karbońskie utwory klastyczne stanowią najmłodszą jednostkę litologiczno-stratygraficzną paleozoicznej pokrywy bloku małopolskiego. Występują tylko lokalnie na niewielkich powierzchniach w obrębie struktur depresyjnych o charakterze blokowym, skąd nie zostały usunięte w wyniku procesów erozyjnych, które rozpoczęły się tu już w karbonie (po wizenie górnym) [9].

### **Trias**

Osady triasowe zalegają niezgodnie na utworach karbonu. Występują w czterech osobnych blokach o granicach tektonicznych lub erozyjnych. Trias generalnie zapada monoklinalnie w kierunku południowym i południowo-zachodnim. Jego strop zalega na głębokości od około –2800 m do ponad –4300 m. Miąższość, ze względu na erozję starokimeryjską, jest dość zróżnicowana, maksymalnie dochodzi do około 300 m. W profilu tych utworów występuje trias dolny, środkowy i górny. Pod koniec triasu, w wyniku fazy starokimeryjskiej, następuje wydzwignięcie obszaru, co zaznacza się redukcją miąższości bądź całkowitym usunięciem utworów triasu na znacznej części obszaru [10].

### **Jura**

Profil osadów jurajskich stanowią terygeniczne utwory jury środkowej (dogger) i węglanowe jury górnej (malm). Występują one na głębokości od około –2700 m w N i W części obszaru do około –3100 m w rejonie odwiertu Mogielnice-1,

choć w S części obszaru strop utworów jurajskich może zalegać nawet na głębokości poniżej  $-5500$  m [10]. Utwory jurajskie są obecne w zachodniej części obszaru badań; w kierunku W ich miąższość wzrasta.

### **Kreda**

Utwory kredowe, zaliczane do podłoża utworów autochtonicznych miocenu, na analizowanym obszarze występują lokalnie w rowach tektonicznych, stanowiących obniżenia podłoża przedmioceńskiego. Utwory dolnokredowe wykształcone są w postaci wapieni, partiami dolomitycznych oraz oolitowo-organodetrytycznych, a także margli, natomiast utwory górnokredowe – głównie w postaci twardych, zbitych wapieni pelitycznych [13].

### **Miocen**

Płytkomorskie, niekiedy lądowe (molasowe) utwory miocenske osadzały się w basenie przedgórskim, powstałym na przedpolu Karpat. Ich podłoże w północnej części omawianego obszaru najczęściej stanowią utwory prekambriu, natomiast w części południowej – utwory paleozoiczne, od ordowiku do karbonu lub też, lokalnie, utwory mezozoiczne wypełniające zagłębienia w paleozoicznym podłożu [10].

Basen powstał na skutek fleksuralnego ugięcia platformowego przedpola, spowodowanego naciskiem przesuwającego się w kierunku północnym orogenu karpackiego [12]. Osady badenu i sarmatu reprezentowane są głównie przez mułowce, iłowce i piaskowce facji deltowej, których łączna miąższość w strefie brzeżnej nasunięcia przekracza niekiedy  $3000$  m.

### **Karpacka formacja fliszowa**

Orogen karpacki na analizowanym obszarze reprezentowany jest przez utwory kredy i trzeciorzędu. Są to prawie wyłącznie typowe osady fliszowe składające się z naprzemianległych łupków ilastych lub margli i piaskowców, które osadzały się w głębokich rowach tektonicznych (geosynklinach). Szerokość basenu karpackiego, w wyniku kompresji wywołanej kolizją płyt, związaną z ruchami młodoolpejskimi (w górnym miocenie), została wielokrotnie zredukowana [21]. Doprowadziło to do powstania struktur fałdowo-nasuwczych w obrębie osadów fliszowych, ich wydźwignięcia oraz nasunięcia na utwory osadzające się na przedpolu orogenu [23]. Na przeważającej części omawianego obszaru osady fliszowe Karpat zalegają na młodszych, autochtonicznych utworach miocenu. Miąższość formacji fliszowych w rejonie badań dochodzi niekiedy do  $6000$  m.

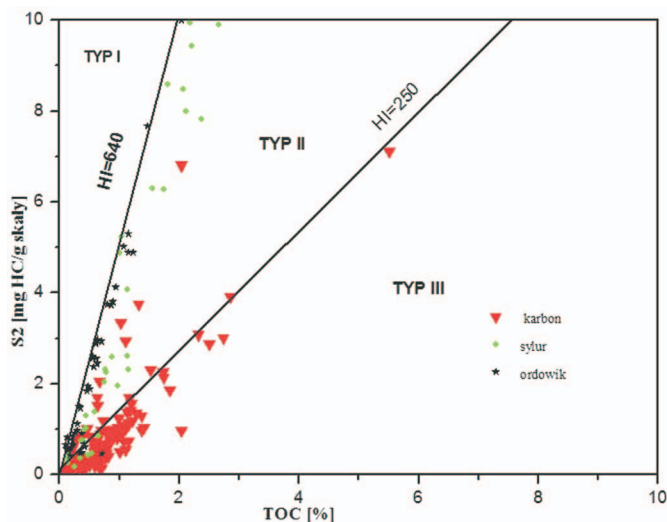
## **Charakterystyka geochemiczna potencjalnych skał macierzystych**

Badania geochemiczne skał nawierconych na obszarze badań, wykonane na przestrzeni ostatnich lat w INiG – PIB, wykazały, iż potencjalnymi skałami macierzystymi dla ropy naftowej i gazu ziemnego mogą być, zalegające tu pod nasuniętymi utworami fliszu karpackiego, paleozoiczne utwory ordowiku, syluru, dewonu dolnego oraz karbonu facji terygenicznego kulmu.

### **Utwory ordowiku**

Uzyskane wyniki badań pirolitycznych i biomarkerów pozwalają na pewne uogólnienia dotyczące ich charakteru geochemicznego. Do skał potencjalnie macierzystych można zaliczyć utwory ordowiku środkowego, dla których oznaczone wartości TOC (ang. *Total Organic Carbon*) wynoszą od  $0,26\%$  do  $2,45\%$  wag. (rysunek 2). Substancja organiczna utworów ordowiku wykazuje wysoki wskaźnik wodorowy, świadczący o preferencjach generowania węglowodorów ropnych. Utwory te zawierają II typ kerogenu, o dużej zawartości ropotwórczego egzynitu oraz substancji amorficznej [18]. Najwyższy potencjał węglowodorowy posiadają próbki z odwiertu N-12, gdzie wartości potencjału genetycznego należą do zakresu od  $6,5$  do  $12,5$  mg HC/g skały. Nieco niższe wartości potencjału genetycznego wykazują próbki ordowickie z odwiertu H-1, wynoszą one od  $1,42$  do  $7,67$  mg HC/g skały. Próbki te

charakteryzują się wysokim stopniem przeobrażenia termicznego, a poziom transformacji ich kerogenu oszacowano na  $80\%$ . Niższe zawartości TOC w utworach ordowickich stwierdzono w odwiertach usytuowanych w zachodniej części bloku małopolskiego, np. w otworze P-40 ( $0,44 \pm 1,05\%$ ). Stopień przeobrażenia termicznego określony na podstawie badań pirolitycznych jest wyższy w odwiertach H-1 i K-12 i znacznie niższy w odwiertach N-6 oraz P-40. W składzie grupowym na ogół przeważały związki węglowodorowe, a w pojedynczych przypadkach zauważalny był wysoki udział związków żywiczych, nawet do  $56\%$ . Analiza chromatograficzna frakcji nasyconej i skład biomarkerów pozwalają na rozróżnienie utworów ordowiku dolnego i środkowego. W próbkach reprezentujących utwory ordowiku środkowego skład n-alkanów w zakresie n-C<sub>17</sub>–n-C<sub>21</sub> świadczy o typowo morskim pochodzeniu substancji macierzystej typu algowego i wysokim stopniu jej dojrzałości termicznej. Cechą charakterystyczną dystrybucji węglowodorów n-alkanowych i izoalkanowych jest znacząca dominacja pristanu nad fitanem (Pr/Ph w zakresie od  $1,85$  do  $2,9$ ), co wskazuje na tlenowe środowisko depozycji osadów morskich [16]. Ekstrakty bituminów z utworów ordowiku górnego cechuje krótszy zakres występowania węglowodorów. Jest to szczególnie widoczne w otworach N-6 (głęb.  $4018$  m) i K-12 (głęb.  $3653$  m).



Rys. 2. Diagram oceny macierzystości utworów potencjalnie macierzystych we wschodniej części bloku małopolskiego (rejon złoża Nosówka)

### Utwory syluru

Badania macierzystości skał syluru przeprowadzone w analizowanym obszarze przedgórze Karpat wykazały, że najlepszymi parametrami charakteryzują się utwory nawiercone w odwiertach H-1, P-40 i B-2. Zawierają one II (ropotwórczy) typ kerogenu, o wartościach wskaźnika wodorowego w granicach 200÷350 mg HC/g TOC. Zawartość substancji organicznej TOC wynosi w nich od 0,75% wag., w próbkach z odwiertu B-1, do 2,65%, w próbkach z odwiertu H-1. Poziom dojrzałości termicznej, wyrażony za pomocą wskaźnika pirolitycznego  $T_{max}$  w zakresie 444÷448°C, wskazuje, iż badane osady osiągnęły główną fazę generowania węglowodorów ciekłych.

Potencjał genetyczny jest również wysoki, o wartościach do 11,7 mg HC/g skały, co stawia je wysoko w klasyfikacji ropotwórczości (rysunek 2). Substancja organiczna utworów syluru zawiera głównie II typ kerogenu, o preferencjach generowania ropy naftowej. Dojrzałość termiczna tych osadów na poziomie okna ropnego i typ kerogenu pozwalają sądzić, iż część węglowodorów została wygenerowana. Podobne wnioski można wysnuć na podstawie wyników analizy pirolitycznej i elementarnej wyseparowanego kerogenu, gdzie wyraźnie zaznacza się wysoki udział wodoru w stosunku do węgla i bardzo niski stosunek tlenu do węgla, co uwidoczni się w wartościach wskaźników HI i OI.

Obraz mikroskopowy próbek sylurskich wskazuje na obecność bardzo dużej ilości substancji organicznej, w postaci porożrywanych lamin, smug i soczewek oraz ostrokrawędzistych małych ziaren macerałów witrinitowych. Widoczne w świetle fluorescencyjnym macerały z grupy egzynitowej występują w bardzo dużej ilości (przewaga alginitu, kutynitu, sporynitu), co może świadczyć o większym udziale substancji organicznej typu sapropelowego niż substancji humusowej [7].

Procesy generacji znajdują potwierdzenie w stopniu nasycenia substancją bitumiczną, stąd wysokie wartości zarówno parametru  $S_1$  z pirolizy Rock-Eval, jak i wydajności ekstraktów bituminów [17]. Najwyższe nasycenie substancją bitumiczną stwierdzono w odwiercie H-1, gdzie wartości ESO wynosiły od 1000 ppm do 4150 ppm. W składzie grupowym substancji bitumicznej zawartość węglowodorów oraz związków żywiczno-asfaltenowych jest porównywalna. Analiza chromatograficzna frakcji nasyconej wykazała dominację n-alkanów w zakresie węglowodorów niskocząsteczkowych ( $n-C_{17}$ – $n-C_{19}$ ), a także przewagę pristanu nad odpowiednim n-alkanem ( $n-C_{17}$ ), co może być wynikiem tego, iż węglowodory o strukturach prostolańcuchowych w pierwszej kolejności ulegają ekspulsji. Zaskakujący jest fakt istnienia wśród izoprenoidów przewagi pristanu nad fitanem, co zwykle tłumaczy się tlenowymi warunkami depozycji osadów macierzystych (Pr/Ph w zakresie 1,74÷3,18). Charakterystyczną cechą frakcji nasyconej w utworach sylurskich jest występowanie szeregu homologicznego n-alkanów w szerokim zakresie mas cząsteczkowych, do 33 atomów węgla w cząsteczce, a nawet powyżej.

W badanych próbkach zaobserwowano niskie koncentracje biomarkerów z grupy hopanów i steraanów. Biomarkery te w większości badanych próbek sylurskich osiągnęły stany równowagowe izomerów optycznych i sferycznych, co zazwyczaj odpowiada fazie generowania węglowodorów w oknie ropnym. Również obliczona wartość refleksyjności witrinitu, na podstawie dystrybucji biomarkerów frakcji aromatycznej (MPI – wskaźnik metylofenantrenowy i 4MDB-T/1MDBT – wskaźnik metylo-dibenzotiofenowy), wskazuje na osiągnięcie stosunkowo wysokiej dojrzałości, odpowiadającej refleksyjności witrinitu na poziomie 0,84%.

Skład biomarkerów pozwala wnioskować o niższej dojrzałości utworów syluru w zachodniej części bloku małopolskiego (w rejonie Pilzna) w stosunku do wschodniej części obszaru badań. Cechą charakterystyczną osadów sylurskich jest wskaźnik biomarkerowy, którego obecność można wiązać z typem osadów pelagicznych [17]. Parametry dojrzałości przemawiają za tym, że w skałach tych występowały procesy generacji węglowodorów ciekłych (główna faza okna ropnego). Podsumowując dane opisujące ropotwórczość badanych utworów syluru na przedgórzu Karpat, można stwierdzić, że skały sylurskie w badanym rejonie, w analizowanych otworach, charakteryzują się dobrymi parametrami macierzystości, a najlepsze skały macierzyste zidentyfikowano w odwiertach H-1 i P-40.

### Utwory dewonu

Analizowane skały dewońskie wykazywały na ogół bardzo niskie parametry macierzystości. Materia organiczna

zawiera głównie macerały z grupy liptynitów [16]. Zawartość substancji organicznej rzadko przekraczała progową wartość – 0,5% wag. TOC. Wyniki badań raczej wykluczają dewońskie utwory facji węglanowej jako potencjalne źródło generacji węglowodorów. Jedynie niewielkiej miąższości wkładki utworów klastycznych w utworach dewonu dolnego, rozpoznane w odwiercie T-3, wykazują cechy macierzystości i mogą być źródłem węglowodorów. Utwory te zawierają II typ ropotwórczego kerogenu, wykazującego stopień przeobrażenia termicznego na poziomie głównej fazy okna ropnego ( $T_{max}$  w zakresie 441÷448°C, refleksyjność wityrynitów powyżej 0,6%  $R_o$ ). Dla rekonstrukcji początkowego potencjału generacyjnego tych utworów oszacowano wielkość pierwotnego wskaźnika wodorowego kerogenu (HI), który wynosi około 560 mg HC/g TOC.

### Utwory karbonu

Badania macierzystości węglanowych skał karbońskich przeprowadzono na próbkach z otworów: Będ-2, H-1, K-11 i 12, N-2, 6 i 7, Z-1.

Jako skały potencjalnie macierzyste można traktować jedynie osady terygeniczne kulmu (utwory stropowej części karbonu dolnego), składające się przeważnie z ilowców i mułowców, w których zawartość TOC jest niska (najczęściej poniżej 1% wag.). W pojedynczych próbkach zawartość TOC osiąga wartości wyższe, dochodzące do 5,51% wag. w odwiercie N-6, 2,32% wag. w odwiercie C-1 oraz 1,41% wag. w odwiercie Z-1. Obliczone miąższości efektywne są znacznie wyższe w rejonie Zagorzyc i Czudca, gdzie oceniono je na 200÷311 m, podczas gdy w rejonie Nosówki efektywne miąższości oszacowano w zakresie 20÷150 m. W pozostałych odwiertach w rejonie Nosówki utwory karbonu wykazują znacznie niższe zawartości TOC – średnio 0,27÷0,31% wag. Z kolei w odwiertach N-2 i N-5, z akumulacją ropy naftowej w utworach karbonu, osady charakteryzują się najniższą zawartością substancji organicznej, także tej ekstrahowalnej [16, 18]. Wobec tak niskiego nasycenia substancją bitumiczną, o składzie wskazującym na akumulację ropy naftowej, należy sądzić, iż jest to złożo występujące w szczeliniowatych skałach węglanowych.

Wśród badanych profili odwiertów, nawiercających utwory karbońskie w całym analizowanym obszarze, można zaobserwować pewne różnice w jakości substancji kerogenowej. W rejonie Nosówki dobre właściwości kerogenu, o wysokim

wskaźniku wodorowym, wykazują próbki ze stropowej części profilu karbonu w otworach K-12 i N-12.

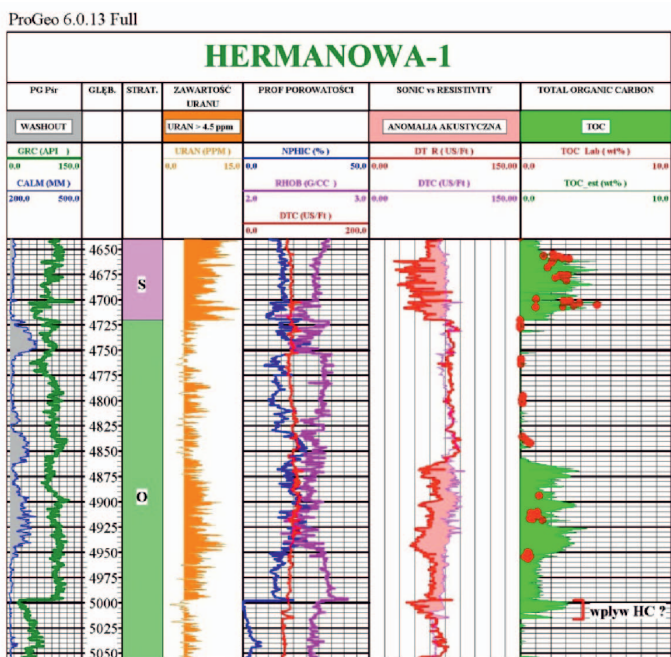
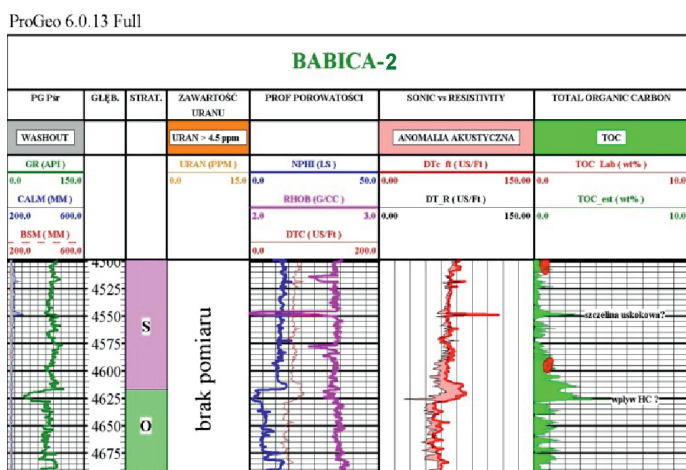
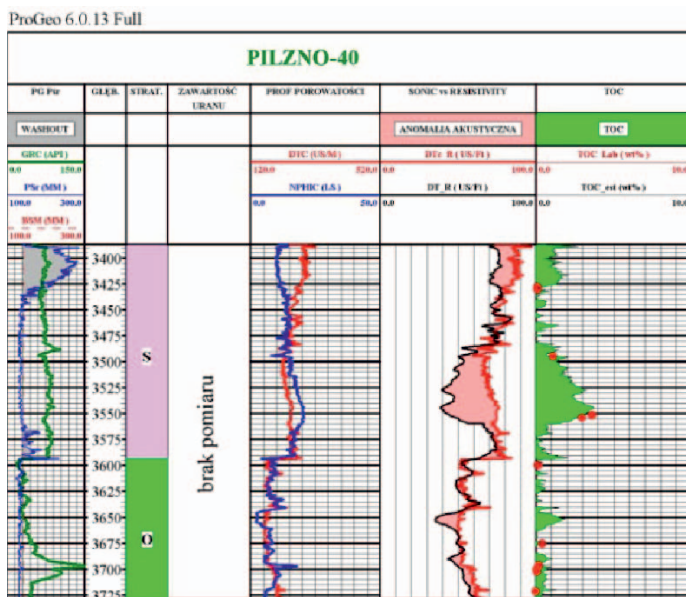
Poza powyższymi przypadkami można stwierdzić, że substancja organiczna występująca w utworach karbonu w tej części bloku małopolskiego zawiera w przewodzie III typ kerogenu, o niskim wskaźniku wodorowym i bardzo zróżnicowanym wskaźniku tlenowym. Stopień dojrzałości termicznej, wyrażony poprzez pomiar  $T_{max}$ , wykazał pewne zróżnicowanie, od progowej dojrzałości do fazy procesów termokatalitycznych, o największym zaawansowaniu w odwiercie C-1 na głębokości ponad –4200 m oraz w N-6 na głębokości –3698 m [15, 18].

Analiza chromatograficzna frakcji nasyconej potwierdziła zróżnicowanie pomiędzy węglowodorami wytworzonymi w skałach pochodzenia terygenicznego (kulm) a węglanowego (wizen). W pierwszych z nich dominują n-alkany, w zakresie większej liczby węgli w łańcuchu węglowodorowym, i przeważa pristan nad fitanem, co wskazuje na tlenowe warunki deponowania osadów. W utworach wizenu fitan występuje w pewnej przewodzie nad pristanem, sugerując beztlenowe warunki deponowania substancji macierzystej (otwór H-1). Utwory kulmu z odwiertów Z-6 i N-6 w analizie biomarkerów wykazały obecność wąskiego zakresu szeregu homologicznego n-alkanów, n-C<sub>16</sub>–n-C<sub>27</sub>, z maksimami przypadającymi na homologi n-C<sub>18</sub>–n-C<sub>20</sub>. Na spektrogramach masowych w trybie pełnego skanowania (TIC) obserwowano występowanie biomarkerów z grupy steraanów i hopenów. Wartości stosunków Pr/Ph > 1 oraz Pr/n-C<sub>17</sub> > 1 wskazują tlenowe środowisko depozycji materii źródłowej. W badanych próbkach karbonu dolnego rejonu Nosówki struktury tricyklicznych terpenów stanowią nieznaczny udział ogólnych struktur terpenowych. Wśród tricyklicznych terpenów dominuje  $t_{23}$ , obecny jest również tetracykliczny terpen  $t_{24}$ . Skład hopenów o przedłużonym łańcuchu bocznym wykazuje typową, regularną, zmniejszającą się ich koncentrację w szeregu, od najwyższego pików homohopanu C<sub>31</sub> do pentakisohopanu C<sub>35</sub>, co związane jest ze środowiskiem tlenowym. W wysokiej koncentracji oprócz hopenu C<sub>30</sub> występuje norhopen C<sub>29</sub> i Tm (17 $\alpha$ (H)-22,29,30-trinorneohopen). Wysoka zawartość C<sub>29</sub> 17 $\alpha$ (H) norhopenu cechuje ekstrakty pochodzące ze skał węglanowych i ewaporatowych [4]. Obliczone wskaźniki termicznego przeobrażenia skał z rozkładu biomarkerów są charakterystyczne dla osadów, które wchodzi w początkową fazę procesów generacji ropy naftowej.

### Charakterystyka macierzystości utworów dolnopaleozoicznych na podstawie danych geofizyki wiertniczej

Geofizyczna charakterystyka skał macierzystych, od lat badana przez wiodące ośrodki światowe, opiera się na wpływie, jaki wywiera obecność materii organicznej,

określana przez parametr TOC, na zapis poszczególnych profilowań geofizycznych wykonywanych w otworach wiertniczych [22]. W pracy przeprowadzono interpretację



Rys. 3. Analiza danych geofizyki wiertniczej pod kątem wyznaczania zawartości materii organicznej (TOC) utworów syluru i ordowiku w otworach: Pilzno-40, Babica-1 i Hermanowa-1

zawartości TOC, opierając się na profilowaniach geofizyki wiertniczej metodą LRSL, zaproponowaną przez Bowmana [1]. Wyniki pomiarów laboratoryjnych TOC posłużyły jako dane kalibracyjne w interpretacji profilowań geofizyki wiertniczej. Wykorzystanie tej metody pozwala na wyznaczenie granic stropu i spągu (miąższości) poziomów macierzystych oraz na rzetelną ekstrapolację wartości TOC na nieoprobowane interwały, co umożliwia obliczenie średnich zawartości substancji organicznej w poziomach skał macierzystych. Wyznaczone średnie wartości w punktach basenu o współrzędnych odpowiadających lokalizacji odwiertów posłużyły do konstrukcji map oraz estymacji trendów poziomej zmienności zawartości TOC w poszczególnych poziomach macierzystych w rejonie badań.

Interpretację wykonano w profilach utworów dolnego paleozoiku (sylur, ordowik) w trzech odwiertach usytuowanych w brzeżnej strefie nasunięcia karpackiego, wzdłuż generalnego profilu o rozciągłości W-E, w rejonie Pilzno-Rzeszów, zaczynając od otworu Pilzno-40, poprzez odwiert Babica-2 i kończąc na odwiercie Hermanowa-1, we wschodniej części rozpatrywanego obszaru. Wyniki, zamieszczone na rysunku 3, wykazują znaczną zmienność przestrzenną utworów dolnego paleozoiku, zarówno co do hipsometrycznego poziomu zalegania całego kompleksu dolnego paleozoiku, jak i miąższości poszczególnych ogniw stratygraficznych oraz cech potencjalnej macierzystości. Generalnemu zapadaniu w kierunku wschodnim towarzyszy znaczna redukcja miąższości utworów sylurskich na korzyść ordowickich. Wyliczona zawartość TOC, skalibrowana na podstawie dostępnych wyników badań laboratoryjnych, potwierdziła potencjalne znaczenie omawianych utworów jako skał macierzystych. Zarówno w odwiercie Pilzno-40, jak i Hermanowa-1 w obrębie piętra syluru wyliczone zawartości TOC dochodzą do 4÷5% wag. W rozbudowanym do miąższości około 350 m piętrze ordowiku w odwiercie Hermanowa-1 również można zaobserwować około 100-metrowy interwał, w którego obrębie średni poziom wyestymowanej zawartości TOC znacznie przekracza wartość 1,5% wag. Potwierdzeniem wniosku o możliwym źródłowym charakterze omawianych formacji są obserwowane na wynikach spektrometrycznego profilowania gamma SGR anomalie składowej uranowej, która bardzo dobrze koreluje z wyinterpretowanymi wartościami TOC. Lokalnie koncentracje uranu osiągają wartość 15 ppm, co aż trzykrotnie przekracza poziom naturalnej promieniotwórczości pochodzącej od izotopów uranu w materiale ilastym. Najslabsze cechy skał macierzystych obserwuje się w profilu otworu Babica-2 – tylko lokalnie wyliczone zawartości TOC przekraczają 1% wag.

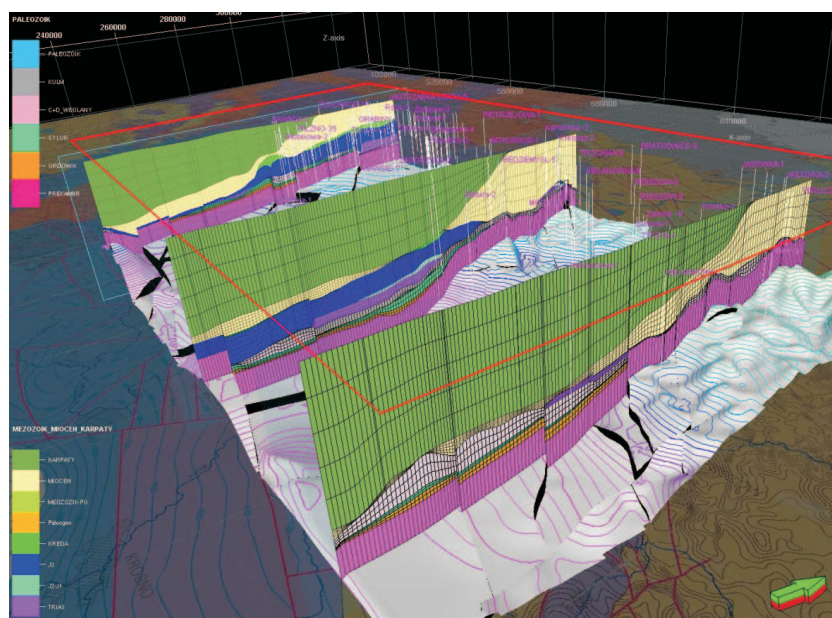
## Numeryczny model strukturalny obszaru badań

Model strukturalny obszaru badań, obejmujący utwory od spągu paleozoiku po najwyższe zalegające osady fliszowe (w części S) oraz molasowe utwory miocenu (w części N), został opracowany na podstawie trzech typów danych: otworowych profili stratygraficznych, wyników interpretacji danych sejsmicznych 3D (lokalnie) oraz opublikowanych opracowań tektoniczno-kartograficznych [2]. Obraz strukturalny utworów paleozoicznych (ordowiku, syluru, dewonu dolnego, węglanowych utworów dewonu środkowego, górnego oraz karbonu dolnego i klastycznych utworów kulmu), w szczególności system dyslokacji tektonicznych, odtworzono na podstawie map zamieszczonych w *Atlasie geologiczno-strukturalnym paleozoicznego podłoża Karpat zewnętrznych i zapadliska przedkarpackiego* pod redakcją Zbigniewa Buły i Ryszarda Habryna [2, 3] oraz danych otworowych, które pozwoliły na kontrolę i korektę głębokości zalegania granic stratygraficzno-litologicznych oraz miąższości poszczególnych formacji geologicznych (rysunek 4 i 5). Powierzchnie strukturalne osadów mezozoicznych, reprezentowanych na obszarze badań przez utwory triasu dolnego, środkowego i górnego, jury środkowej i górnej oraz kredy dolnej i górnej, opracowano poprzez integrację wyników interpretacji strukturalnych danych sejsmicznych 3D oraz danych stratygraficznych w profilach otworów wiertniczych. Układ geometryczny osadów deponowanych w miocennym basenie sedimentacyjnym, traktowanych jako całość, oraz nasuniętych utworów formacji fliszowej (także traktowanych całościowo)

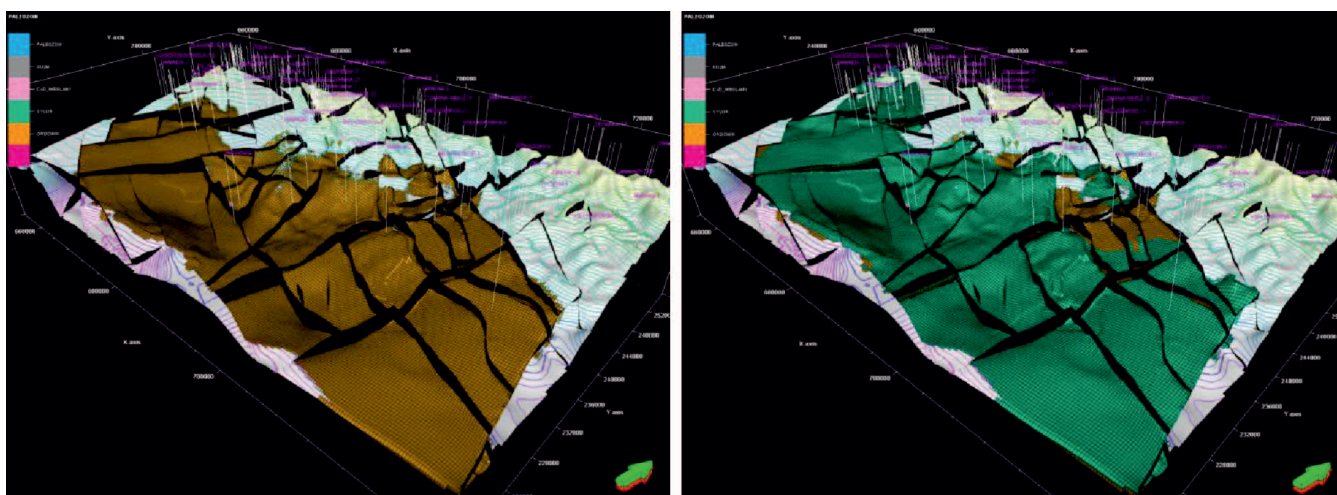
odtworzono przede wszystkim na podstawie danych otworowych oraz lokalnie fragmentów danych sejsmicznych.

Uzyskany w ten sposób obraz cechuje znaczna złożoność i obecność czterech głównych systemów naftowych (paleozoicznego, mezozoicznego, miocennego i nasuniętego orogenu karpackiego), w których obrębie występują zarówno skały macierzyste, jak i potencjalne poziomy zbiornikowe.

Z punktu widzenia analizy dynamiki procesów geologicznych zachodzących w systemach naftowych rola modelu strukturalno-parametrycznego znacznie wykracza poza dostarczenie ram geometrycznych modelu. Pozycja strukturalna oraz typ litologiczny skał budujących basen



Rys. 4. Arbitralne przekroje przez przestrzenny model strukturalny obszaru badań obejmujący pełny profil geologiczny strefy brzeżnej nasunięcia formacji fliszowej Karpat zewnętrznych



Rys. 5. Wizualizacja sposobu odtworzenia zasięgów występowania macierzystych formacji ordowiku (po lewej – kolor brązowy) i syluru (po prawej – kolor zielony) w ramach modelu geologicznego 3D obszaru badań



sedymenacyjny z jednej strony wyznaczają ich przynależność do określonego elementu systemu naftowego (skała macierzysta, zbiornikowa, uszczelnienie, nadkład), a jednocześnie determinują przebieg ewolucji właściwości charakteryzujących formacje geologiczne w funkcji czasu geologicznego oraz zachodzących procesów generowania, ekspulsji i migracji węglowodorów [5]. Dotyczy to m.in.: przebiegu i charakteru procesów diagenezy i kompaktacji

osadów; przewodności i pojemności cieplnej; emisji ciepła radiogenicznego, związanej z zawartością minerałów ilastych; parametrów geomechanicznych; charakterystyki przepływu płynów złożowych; ewolucji pola ciśnień geostatycznych i porowych [5, 24]. Właściwości te określają m.in. zdolność akumulacyjną poziomów zbiornikowych i jakość ich uszczelnienia w funkcji czasu geologicznego, jak również wpływają na warunki termiczne formacji skał macierzystych.

### Założenia modelu systemu naftowego

Model strukturalny, przedstawiający obecną architekturę obszaru poszukiwawczego, stanowi bazę do tworzenia przestrzennych, dynamicznych (4D) modeli obrazujących przebieg i skutki procesów geologicznych zachodzących w skali czasu geologicznego [5, 24]. Konstrukcja modeli dynamicznych polegała na testowaniu takich założeń ewolucji poszczególnych procesów geologicznych zachodzących w basenie jak: tempo sedymentacji, wielkość i tempo erozji, paleobatymetria, ewolucja strumienia cieplnego, ewolucja kompaktacji itd., które to założenia, realizowane w procesie symulacji (*forward modeling*), prowadziły do uzyskania wspólnego obrazu i oceny charakteru basenu, tzn. nie tylko jego przestrzennej budowy strukturalnej, ale również wartości mierzalnych parametrów. Pomierzone wartości tych parametrów (porowatości, przepuszczalności, ciśnienia, temperatury, stopnia przeobrażenia termicznego itd.) wykorzystywane były jako parametry kalibracyjne.

Wydzielonym warstwom zalegającym w poszczególnych interwałach głębokościowych przypisano czas początku i końca sedymentacji (w skali wieku bezwzględnego, co wyznaczało także tempo ich sedymentacji) oraz rolę w systemie naftowym (potencjalne skały macierzyste – ordowik, sylur, kulm; potencjalne skały zbiornikowe – utwory węglanowe od dewonu środkowego do jury włącznie). Na skalę czasową budowanego modelu wprowadzono także interwały czasowe okresów erozji i luk sedymentacyjnych.

Dla każdej warstwy zdefiniowano litotyp – typ litologiczny skały, dominujący w danym interwale, który determinował przebieg procesów kompaktacji, skutkujących zmianami porowatości, przepuszczalności, przewodności cieplnej, pojemności cieplnej, ciepła radiogenicznego itp., w zależności od etapu rozwoju basenu sedymentacyjnego.

Założenia przyjętej ewolucji basenu uwzględniały występowanie w analizowanym obszarze pionowych, pulsacyjnych ruchów tektonicznych [3], prowadzących do powstawania uskoku oraz zmian paleogłębokości basenu, skutkujących obecnością luk sedymentacyjnych i okresów erozji o zróżnicowanym zasięgu i skali. Powstałe w dolnym paleozoiku

strefy dyslokacji były prawdopodobnie kilkakrotnie reaktywowane w okresie późniejszym, w tym również po nasunięciu orogenu karpackiego [3].

Analiza kolejnych etapów rozwoju basenu prowadzona na podstawie modelu strukturalnego, przede wszystkim na sekwencji warstw, pozwoliła na wyciągnięcie wniosków odnośnie do procesów erozji na przestrzeni czasu geologicznego. Wyodrębniono cztery główne epizody erozji, tj.:

- I w okresie syluru górnego – dewonu dolnego – który swoim zasięgiem objął cały analizowany obszar, doprowadzając do całkowitego usunięcia osadów ordowiku i syluru w jego północnej części;
- II w okresie karbonu górnego – permu – który, oprócz erozji utworów prekambryjskich, odsłaniających się w N części obszaru, doprowadził do znacznej redukcji węglanowych utworów strukturalnego piętra dewońsko-karbońskiego;
- III w okresie jury dolnej – którego efektem na części obszaru było całkowite usunięcie osadów triasu;
- IV w okresie kredy górnej – paleogenu – mający ostateczny wpływ na morfologię powierzchni podmiocenińskiej.

Ponieważ głównym celem pracy była analiza procesów generowania, ekspulsji, migracji i akumulacji węglowodorów w obrębie utworów paleozoicznych, w modelu nie uwzględniano tektoniczno-basenowego rozwoju Karpat zewnętrznych.

Generalnie zakładane miąższości erozji w poszczególnych etapach rozwoju basenu sedymentacyjnego szacowano, opierając się na istniejących trendach zróżnicowania miąższości zarejestrowanych w otworach wiertniczych. Ostatecznie wielkości erozji kalibrowane były na podstawie parametru dojrzałości termicznej skał macierzystych, przy zakładanej wielkości gęstości powierzchniowej strumienia cieplnego.

Budowa modelu termicznego, odwzorowującego rozkład paleotemperatur w basenie sedymentacyjnym, polegała na rekonstrukcji zmiennych w czasie geologicznym parametrów definiujących warunki brzegowe modelu, którymi są: wartości paleotemperatur kontaktu woda/osady (SWIT – *sediment-water interface temperature*) i gęstość paleostrumienia cieplnego podłoża, a także na przypisaniu poszczególnym

wydzieleniom litostratygraficznym odpowiednich charakterystyk kontrolujących przepływ ciepła i wartości parametrów termicznych (przewodności cieplnej, pojemności cieplnej, ciepła radiogenicznego).

Parametr SWIT został obliczony na podstawie zrekonstruowanych paleogłębokości basenu (PWD – *paleo-water depth*) oraz zmian średnich rocznych powierzchniowych paleotemperatur, uwzględniających globalne zmiany paleoklimatu oraz zmiany szerokości geograficznej, wynikające z migracji płyt tektonicznych oraz ewolucji kierunku osi obrotu Ziemi [26]. Rekonstrukcja gęstości strumienia ciepłego polegała na testowaniu różnych wartości gęstości strumienia ciepłego podłoża i kalibrowaniu go z wykorzystaniem wartości refleksyjności witrynytu  $R_0$ .

### Wyniki modelowania dolnopaleozoicznego systemu naftowego

W efekcie przeprowadzonych symulacji ewolucji dolnopaleozoicznego systemu naftowego odtworzono przebieg procesów naftowych, które w największym stopniu wpływają na wielkość ważne dla poszukiwań węglowodorów, takie jak:

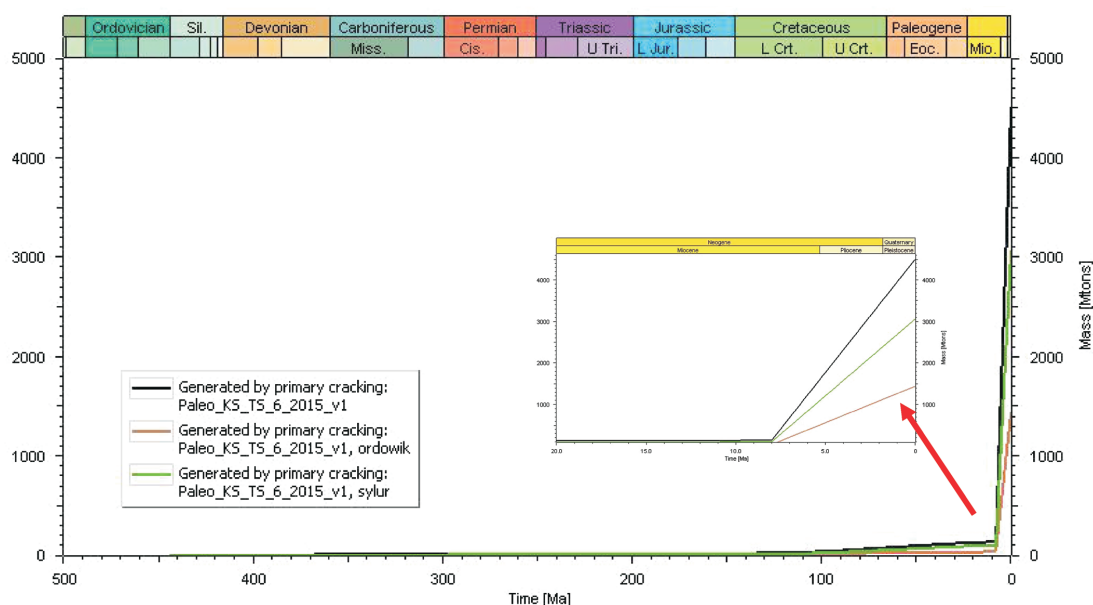
- stopień przeobrażenia termicznego skał macierzystych;
- ilość i czas generacji węglowodorów;
- potencjalne drogi migracji i strefy możliwych akumulacji węglowodorów.

Wyniki wykonanych symulacji wskazują, że inicjacja procesów generowania węglowodorów (początek okna ropnego –  $R_0$  w zakresie  $0,55 \div 0,65\%$ ) w utworach ordowiku i syluru nastąpiła najwcześniej, w najbardziej w tym czasie pogrążonej południowo-centralnej części basenu (rejon otworu Nawsie-1), na przełomie kredy dolnej i górnej, ale

Modele kinetyczne transformacji kerogenu formacji macierzystych definiujące zależność tempa generowania węglowodorów od temperatury opracowane zostały na podstawie laboratoryjnych pomiarów pirolitycznych w INiG – PIB przy użyciu oprogramowania Optkin. Modele te kalibrowane były na podstawie obliczonych wartości stopnia transformacji kerogenu. Ponadto, na podstawie danych o stopniu przeobrażenia termicznego próbek  $T_{max}$  i wielkości rezydualnego potencjału węglowodorowego HI, przeprowadzono rekonstrukcję początkowego potencjału węglowodorowego  $HI_0$  oraz początkowych zawartości węgla organicznego  $TOC_0$ ; parametry te wprowadzono do modelu systemu naftowego w postaci map wartości średnich. Stanowiły one podstawę ilościowych obliczeń skutków procesów naftowych zachodzących w basenie.

ich tempo, z uwagi na przebieg ewolucji basenu, było bardzo powolne (rysunki 6, 7).

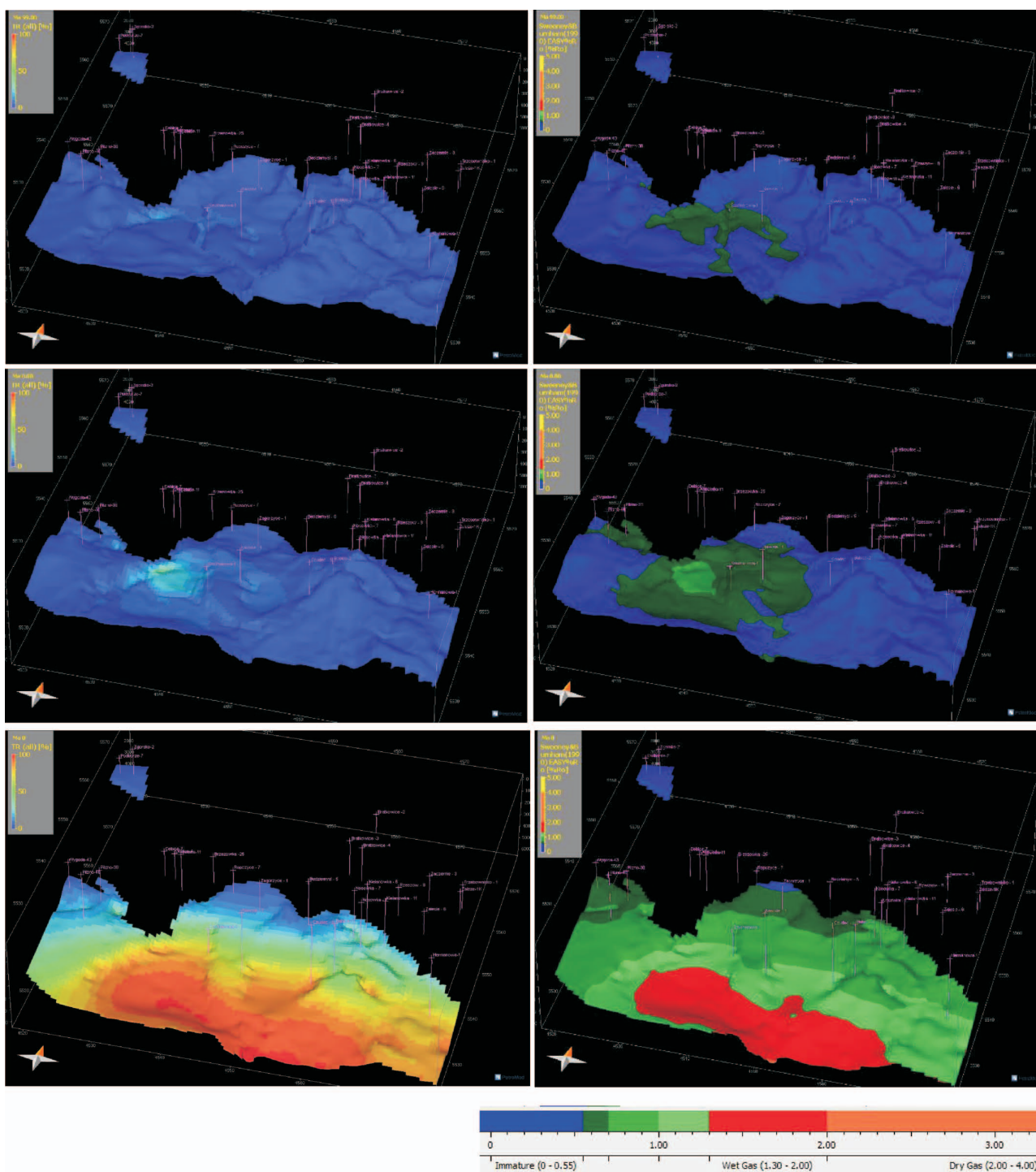
Na przełomie kredy i paleogenu tylko na niewielkiej części analizowanego obszaru poziomy macierzyste, w strefie najgłębszego ich zalegania, weszły w główną fazę okna ropnego, a stopień transformacji kerogenu osiągnął 20%. Na pozostałym obszarze, gdzie głębokość zalegania formacji macierzystych nie przekraczała 2500 m, procesy naftowe praktycznie się nie rozpoczęły. Wyniesienie górotworu, skutkujące erozją utworów kredowych, które nastąpiło w paleogenie i trwało do początku badenu prawie na całym obszarze, spowolniło przebieg procesów naftowych. Dalszy, niewielki przyrost dojrzałości termicznej skał macierzystych następuje wraz z formowaniem się przedgórskiego zapadliska Karpat



Rys. 6. Przebieg procesów generowania węglowodorów przez formacje macierzyste ordowiku (brązowa krzywa) i syluru (zielona krzywa) w skali czasu geologicznego

fliszowych i szybką subsydencją dna basenu, na skutek sedymentacji w nim utworów molasowych badenu i sarmatu. W tym czasie strefa generowania węglowodorów, w początkowej fazie okna ropnego położona w centralnej części obszaru, rozszerzyła się do około 30% powierzchni zalegania utworów ordowickich i sylurskich, ale stopień transformacji kerogenu tylko w najgłębiej zalegających rejonach przekroczył niewiele ponad 30%. Do wyraźnej intensyfikacji

procesów transformacji kerogenu w kierunku węglowodorów doszło dopiero po nasunięciu orogenu karpackiego na autochtoniczne osady badenu i sarmatu. Efektem tego było znaczne pograżenie osadów i rozszerzenie strefy generowania węglowodorów na prawie cały obszar zalegania poziomów macierzystych (rysunek 7). W wyniku zróżnicowanego reżimu termicznego, którego wielkość determinowały temperatura, wynikająca z głębokości, jak również czas pograżenia,



Rys. 7. Ewolucja przeobrażenia substancji organicznej w skali czasu geologicznego (rysunki w lewej kolumnie); odpowiednio: w momencie inicjacji procesów generacyjnych na przełomie kredy dolnej i górnej, 100 Ma (górny rząd), po osadzeniu się utworów sarmatu, 8 Ma (rząd środkowy) i po nasunięciu się orogenu karpackiego, 0 Ma (dolny rząd). W prawej kolumnie – dla analogicznych kroków czasowych – ewolucja okna generowania węglowodorów

skały macierzyste osiągnęły różne fazy generowania węglowodorów. Strefy stopnia transformacji substancji organicznej oraz osiągniętych przez skały macierzyste faz generowania węglowodorów mają przebieg równoleżnikowy i determinowane są głównie głębokością zalegania. Najwyższy stopień transformacji kerogenu, przekraczający 90%, dochodząc przy tym do fazy generowania mokrego gazu, osiągnęły skały macierzyste występujące w południowym fragmencie analizowanego obszaru, gdzie ich pograżenie, wynikające w głównej mierze z miąższości nadkładu górotworu karpacciego, dochodzi do 6000 m. Im dalej na północ, tym utwory macierzyste wykazują mniejszy stopień transformacji termicznej i niższą fazę generowania węglowodorów. Niemniej jednak utwory ordowiku i syluru analizowanego obszaru na ponad 50% zajmowanej przez siebie powierzchni osiągnęły co najmniej końcową fazę generowania węglowodorów ciekłych oraz stopień transformacji substancji organicznej przekraczający 70%.

Analiza ewolucji parametrów takich jak stopień transformacji substancji organicznej czy okno generowania węglowodorów pozwoliła umiejscowić na skali czasu geologicznego początek generowania węglowodorów oraz ukierunkować interpretację systemu naftowego na rozpoznanie charakteru i szczelności skał nadkładu, warunków dla formowania pułapek złożowych, obecności i charakterystyki potencjalnych poziomów zbiornikowych oraz prawdopodobnych dróg migracji płynów złożowych.

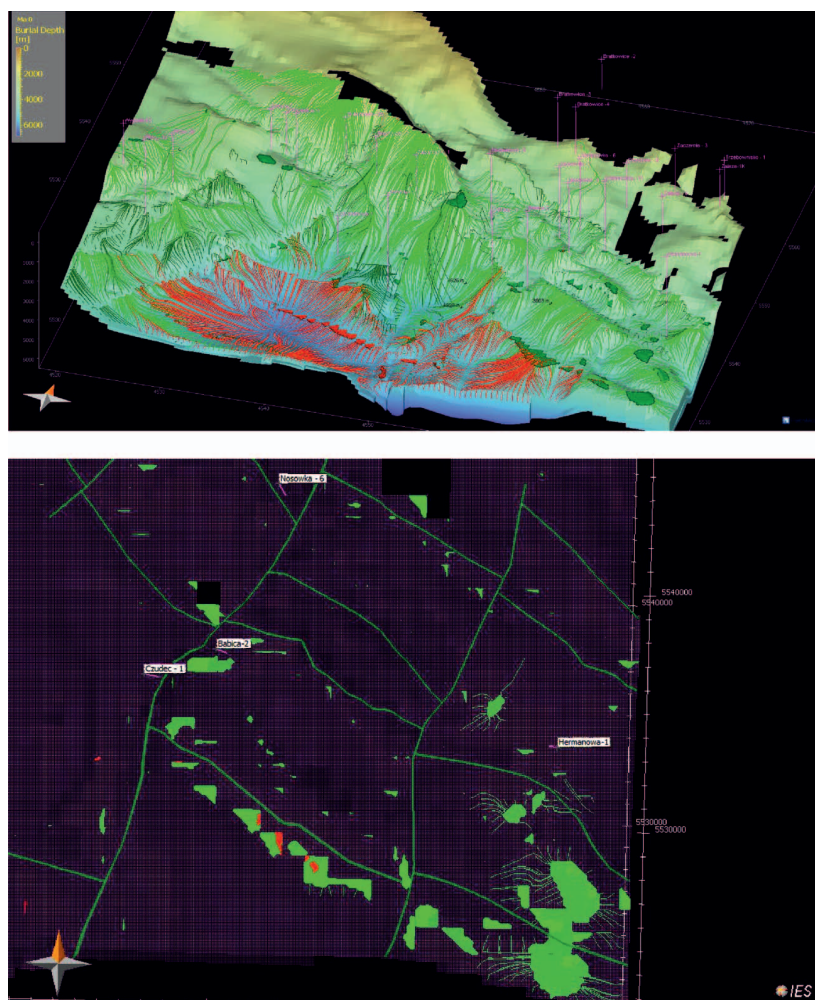
Wyniki modelowania wskazują na możliwość występowania akumulacji ropy naftowej w utworach węglanowych dewonu i karbonu oraz w klastycznych osadach kulmu. Prognostyczne zasoby zakumulowane w paleozoicznych poziomach zbiornikowych analizowanego rejonu są rzędu 50 mln ton, zaś strefa największych akumulacji pokrywa się z obszarem o największej zasobności w TOC i najwyższym potencjale genetycznym HI, w SE części rejonu badań (rysunek 8). Cechą charakterystyczną prognozowanych złóż ropy naftowej jest ich występowanie w sąsiedztwie stref dyslokacyjnych, które stanowiły główne drogi migracji węglowodorów w obrębie formacji paleozoicznych.

Pomimo że głównym obiektem analizy w ramach przeprowadzonych prac symulacyjnych był paleozoiczny system naftowy z formacjami macierzystymi w utworach ordowiku, syluru, dewonu i karbonu oraz potencjalnymi poziomami zbiornikowymi w obrębie dewońsko-kar-

bońskiej formacji węglanowej, uzyskane wyniki mogą mieć istotne znaczenie dla prac poszukiwawczych ukierunkowanych na poziomy zbiornikowe formacji mezozoicznych, mioceńskiej oraz karpacciej formacji fliszowej.

Porównanie wielkości generacji węglowodorów z utworów ordowiku i syluru (około 5 mld ton) z ilościami węglowodorów, które według prognozy zakumulowane zostały w pułapkach (około 50 mln ton), oraz z pozostałą dostępną objętością przestrzeni porowej w nadległych interwałach paleozoicznych o generalnie słabych cechach zbiornikowych skłania do rozważenia kwestii kierunków migracji węglowodorów w nadkładzie utworów paleozoicznych.

W świetle wyników modelowania procesów naftowych do gwałtownej intensyfikacji procesów generacji węglowodorów doszło po nasunięciu karpacciej formacji fliszowej, które spowodowało znaczny przyrost pograżenia analizowanych formacji macierzystych, a tym samym wzrost reżimu



Rys. 8. Wizualizacja stref potencjalnych lokalizacji akumulacji ropy naftowej w utworach węglanowych dewonu i karbonu: linie czerwone – ścieżki migracji gazu, linie jasnozielone – ścieżki migracji ropy naftowej, linie ciemnozielone – uskoki, plamki czerwone – akumulacje gazu, plamki zielone – akumulacje ropy naftowej. Dolny rysunek – prognozowane rozmieszczenie akumulacji ropy naftowej i gazu ziemnego na tle dyslokacji tektonicznych

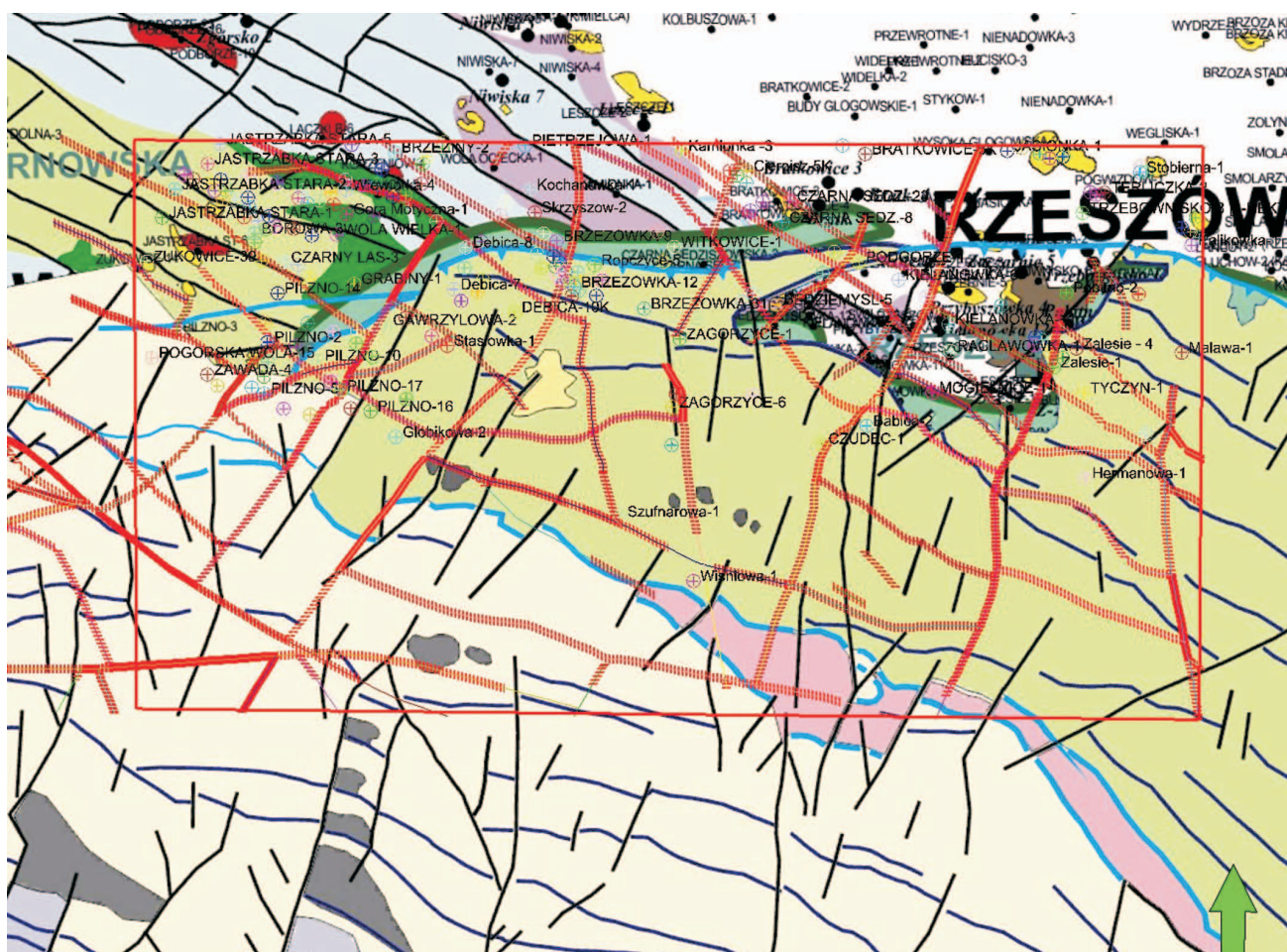
termicznego. Tak więc w czasie, w którym mogło dochodzić do migracji węglowodorów na większą skalę, oprócz paleozoicznego i mezozoicznego (w części W) nadkładu zdeponowane były także osady basenu miocenińskiego oraz nasuniętej z S formacji fliszowej. Część wygenerowanych węglowodorów nasyciała formacje macierzyste do poziomu nasycenia krytycznego, powyżej którego następował proces ekspulsji, natomiast węglowodory, które opuściły formacje macierzyste, migrowały pionowo ku powierzchni lub też częściowo w kierunku pionowym, a następnie, w obrębie bardziej przepuszczalnych formacji, zgodnie z kierunkiem ich wzniosu.

Do niedawna przeważał pogląd o kompresyjnym charakterze deformacji górotworu karpackiego, który raczej wykluczałby możliwość migracji węglowodorów z podłoża paleozoicznego w kierunku pionowym. W ostatnich latach pojawiła się teoria [8], w myśl której w historii tektoniczno-basenowego rozwoju Karpat zewnętrznych istniał także etap ekstensji pokompresyjnej. W etapie tym, zdaniem autorów [8], nastąpiła reaktywacja struktur nasuwczych jako uskoków normalnych i rozpad blokowy obszaru oraz wspólna z podłożem deformacja w formie kolapsowej ekstensji.

Przyjmując powyższą teorię do celów interpretacji możliwych dróg migracji węglowodorów z dolnopaleozoicznych poziomów macierzystych, można postawić hipotezę, że reaktywowane ekstensyjnie strefy dyslokacyjne zakorzenione w podłożu orogenu karpackiego mogły stanowić potencjalne drogi migracji węglowodorów. Co prawda reaktywowane strefy uskokowe mogły sprzyjać rozpraszaniu węglowodorów, ale w specyficznych warunkach mogły również stanowić ścieżki transportu do występujących w profilu formacji fliszowej poziomych zbiorników dla migrujących węglowodorów.

Synteza wyników interpretacji strukturalno-tektonicznych podłoża paleozoicznego [3] oraz fragmentu mapy geologicznej Karpat zewnętrznych z naniesionymi strefami dyslokacji tektonicznych [8] wskazuje na możliwość kontynuacji przebiegu głównych uskoków podłoża w strefach dyslokacyjnych orogenu karpackiego (rysunek 9).

Wobec powyższego można przypuszczać, że odpowiednia koincydencja procesów geologiczno-strukturalnych oraz naftowych zachodzących na przestrzeni czasu geologicznego mogła stwarzać warunki do zasilania poziomów zbiornikowych



Rys. 9. Przebieg głównych uskoków podłoża paleozoicznego (czerwone kontury) na tle fragmentu mapy geologicznej Karpat zewnętrznych (czarne kontury – dyslokacje tektoniczne) [8]

w obrębie formacji fliszowej przez węglowodory wygenerowane z dolnopaleozoicznych formacji macierzystych. Obserwowana zbieżność przebiegu uskoków w utworach dolnego paleozoiku ze strefami dyslokacyjnymi w obrębie karpackiej formacji fliszowej, w połączeniu z czasem i skalą głównego etapu generacji węglowodórów w utworach dolnopaleozoicznych, stanowi, zdaniem autorów, asumpt do rozpatrywania

macierzystych formacji ordowiku i syluru jako jednego z potencjalnych źródeł węglodorów w utworach zbiornikowych karpackiej formacji fliszowej, zwłaszcza w jej głębszych partiach. Należy jednakże zaznaczyć, że do chwili obecnej nie stwierdzono pozytywnych korelacji pomiędzy znanymi akumulacjami węglodorów w utworach fliszowych a skałami macierzystymi podłoża.

### Podsumowanie

1. Modelowanie procesów naftowych w utworach paleozoicznych w strefie brzeżnej nasunięcia Karpat fliszowych wykazało, że potencjał generacyjny utworów macierzystych ordowiku i syluru jest znaczny.
2. Główna faza generowania węglodorów związana jest czasowo z nasuwaniem się orogenu karpackiego na osady molasowe zapadliska przedkarpackiego, rozpoczętym około 8 mln lat temu.
3. Badania korelacyjne w układzie skała macierzysta–ropa naftowa wykazały podobieństwo ropy ze złoża Nosówka w utworach karbonu ze skałami macierzystymi ordowiku i syluru oraz ropy naftowej z odwiertu Babica-2 ze skałami macierzystymi syluru, co dowodzi produktywności analizowanych skał źródłowych.
4. Wyniki symulacji wskazują na istnienie znacznej rozbieżności pomiędzy ilością węglodorów wygenerowanych z utworów dolnego paleozoiku a prognozowanymi zasobami geologicznymi akumulacji ropy naftowej w utworach dewonu i karbonu – a tym bardziej udokumentowanymi zasobami odkrytych złóż, dla których skałami macierzystymi są twory ordowiku i/lub syluru. W związku z tym brak jest obecnie jednoznacznego wyjaśnienia kwestii dróg migracji węglodorów z macierzystych formacji dolnego paleozoiku w mezozoicznym i kenozoicznym nadkładzie.
5. Z kolei czas głównej fazy generowania węglodorów w kontekście ewolucji strukturalnej obszaru badań stanowi przesłankę dla rozpatrywania obok skał węglanowych dewonu i karbonu także innych, wyżej zalegających poziomów zbiornikowych w obrębie formacji mezozoicznych, utworów basenu mioceńskiego lub nawet piaskowcowych interwałów formacji fliszowej jako potencjalnych stref akumulacji migrujących z podłoża węglodorów.
6. Wydaje się, że krokiem zmierzającym do bardziej kompleksowego rozpoznania procesów naftowych w strefie brzeżnej nasunięcia Karpat fliszowych, a tym samym wiarygodniejszej oceny perspektyw poszukiwawczych, powinno być wykonanie spójnej, kompleksowej analizy wszystkich obecnych w profilu elementów systemów naftowych (paleozoicznego, mezozoicznego, mioceńskiego i karpackiego) oraz przeprowadzenie bardziej zaawansowanego modelowania procesów generacji, ekspulsji, migracji i akumulacji węglodorów, z uwzględnieniem wzajemnych zależności pomiędzy procesami zachodzącymi w ww. systemach naftowych. Szczególnie istotne w tym kontekście będzie uwzględnienie w modelu systemów naftowych kolejnych etapów tektoniczno-basynowego rozwoju Karpat zewnętrznych, w odpowiednio wysokiej rozdzielczości czasowej.

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2015, nr 9, s. 632–646

Artykuł nadesłano do Redakcji 17.07.2015 r. Zatwierdzono do druku 1.09.2015 r.

Artykuł powstał na podstawie pracy badawczej pt. *Możliwości generowania i akumulacji węglodorów w paleozoicznych utworach podłoża mioceņu na obszarze pomiędzy Mielcem a Rzeszowem ze szczególnym uwzględnieniem form erozyjnych* – praca INiG – PIB na zlecenie PGNiG S.A.; nr archiwalny: DK-4100-/106/09, nr zlecenia: 397/SG/2009, oraz Projektu celowego nr 6 ZR9 2009 C/07322 pt. *Charakterystyka mezozoicznego systemu naftowego w rejonie Bochnia–Rzeszów pod kątem wyznaczania stref dla nowych akumulacji węglodorów* – na zlecenia MNiSW; nr archiwalny: DK-4100-/119/11, nr zlecenia: 203/SG/2011.

### Literatura

- [1] Bowman T.: *Direct method for Determining Organic Shale Potential From Porosity and Resistivity Logs to Identify Possible Resource Plays*. AAPG Annual Convention & Exhibition, New Orleans, April 2010.
- [2] Bula Z., Habryn R. (red.): *Atlas geologiczno-strukturalny paleozoicznego podłoża Karpat zewnętrznych i zapadliska przedkarpackiego*. Warszawa, Państwowy Instytut Geologiczny, 2008.
- [3] Bula Z.: *Tekst objaśniający do „Atlasu geologiczno-strukturalnego paleozoicznego podłoża Karpat zewnętrznych i zapadliska przedkarpackiego”*. Warszawa, Państwowy Instytut Geologiczny, 2008.
- [4] Grice K., Schouten S., Peters K. E., Sinninghe Damste J. S.: *Molecular isotopic characterization of Palaeocene–Eocene evaporitic, lacustrine source rocks from the Jiangnan Basin, China*. *Organic Geochemistry* 1998, vol. 29, s. 1745–1764.

- [5] Hantschel T., Kauerauf A. I.: *Fundamentals of Basin and Petroleum Systems Modeling*. Springer 2009.
- [6] Heasler H. P., Surdam R. C.: *Thermal evolution of coastal California with application to hydrocarbon maturation*. AAPG Bulletin 1985, vol. 69, no. 9, s. 1386–1400.
- [7] Jachowicz M.: *Wyniki badan palinologicznych*. [W:] *Dokumentacja wynikowa otworu poszukiwawczego Hermanowa-1*. Archiwum PGNiG S.A., Warszawa 2003.
- [8] Jankowski L., Probulski J.: *Rozwoj tektoniczno-basenowy Karpat zewnetrznych na przykladzie budowy geologicznej zloz Grabownica, Strachocina i Lodyna oraz ich otoczenia*. Geologia 2011, t. 37, z. 4, s. 555–583.
- [9] Jawor E., Baran U.: *Budowa geologiczna i charakterystyka utworow karbonu w poludniowej czesci bloku malopolskiego*. [W:] Kotarba M. (red.): *Mozliwosci generowania weglo-wodorow w skalach karbonu w poludniowej czesci bloku gornoslaskiego i malopolskiego*. Kraków, Wydawnictwo TBPS „Geosfera”, 2004, s. 25–48.
- [10] Karnkowski P.: *Wglebne podloze Karpat*. Przegląd Geologiczny 1977, vol. 25, nr 6, s. 289–297.
- [11] Karnkowski P., Glowacki E.: *O budowie geologicznej utworow podmiocenskich przedgorza Karpat srodkowych*. Kwartalnik Geologiczny 1961, vol. 5, nr 2, s. 372–420.
- [12] Krzywiec P.: *Geodynamiczne i tektoniczne uwarunkowania ewolucji basenow przedgorskich, z odniesieniami do zapadli-ska przedkarpackiego*. Przegląd Geologiczny 2006, vol. 54, nr 5, s. 404–412.
- [13] Maksym A., Baszkiewicz A., Gregosiewicz Z., Liszka B., Zdanowski P.: *Srodowiska sedymentacji i wlasciwosci zbiorniko-we utworow najwyzszej jury i kredy dolnej rejonu Brzezow-ka–Zagorzycze na tle budowy geologicznej S czesci zapadli-ska przedkarpackiego*. Przegląd Geologiczny 2001, vol. 49, nr 5, s. 401–407.
- [14] Maksym A., Smist P., Pietrusiak P., Staryszak G., Liszka B.: *Nowe dane o rozwoju utworow dolnopaleozoicznych w rejo-nie Sedziszow Malopolski–Rzeszow w swietle wyników wier-cenia Hermanowa-1*. Przegląd Geologiczny 2003, vol. 51, nr 5, s. 412–418.
- [15] Matyasik I. i in.: *Ranking potencjalnych stref wystepowa-nia akumulacji weglo-wodorow w rejonie Zaczarnie–Swil-cza–Nosowka na bazie wykonanej analizy systemu naftowego*. Archiwum INiG, Kraków 2006.
- [16] Matyasik I., Sloczynski T.: *Utwory paleozoiczne Nosowki jako potencjalne zrodlo dla generacji weglo-wodorow*. Konferencja „Ropa i gaz a skały węglanowe południowej Pol-ski”, Czarna 2008.
- [17] Matyasik I., Sloczynski T., Sowizdzal K., Stadtmüller M., Madej K., Slys M.: *Zastosowanie oprogramowania Petro-Mod 3D do przestrzennego modelowania paleozoicznego systemu naftowego w rejonie przedgorza Karpat*. Prace Naukowe Instytutu Nafty i Gazu 2010, nr 170, s. 695–696.
- [18] Matyasik I., Such P., Lesniak G.: *Paleozoiczny system naftowy wschodniej czesci przedgorza Karpat – od zrodla do pulapki*. Wiadomości Naftowe i Gazownicze 2007, nr 11, s. 7–12.
- [19] Moryc E.: *Budowa geologiczna utworow podloza miocenu w rejonie Pilzno–Debica–Sedziszow Malopolski*. Nafta-Gaz 1996, nr 12, s. 521–550.
- [20] Moryc E.: *Budowa geologiczna utworow podloza miocenu w rejonie Sedziszow Malopolski–Rzeszow i ich perspekty-wicznosc*. Nafta-Gaz 1992, nr 9–10, s. 205–223.
- [21] Osika R. (red. nauk.): *Geologia i surowce mineralne Polski*. Biuletyn Instytutu Geologicznego 1970, nr 251.
- [22] Passey Q. R., Creaney S., Kulla J. B., Moretti F. J., Stro-ud J. D.: *A Practical Model for Organic Richness from Po-rosity and Resistivity Logs*. AAPG Bulletin 1990, vol. 74, is-sue 12, s. 1777–1794.
- [23] Porebski S. J., Warchol M.: *Znaczenie przeplywow hiperpyk-nalnych i klinoform deltowych dla interpretacji sedymento-logicznych formacji z Machowa (miocen zapadli-ska przedkarpackiego)*. Przegląd Geologiczny 2006, vol. 54, nr 5, s. 421–429.
- [24] Sowizdzal K., Sloczynski T., Stadtmüller M.: *Modelowanie 4D systemow naftowych. Dynamiczne, przestrzenne (4D) modelowanie systemow naftowych jako narzedzie prospet-cji naftowej i oceny zasobow konwencjonalnych i niekon-wencjonalnych*. [W:] *Rzeczpospolita lupkowa. Studium wie-dzy o gazie z formacji lupkowych*. Prace Naukowe Instytutu Nafty i Gazu 2012, nr 183.
- [25] Tomczyk H.: *Ordowik i sylur w podlozu zapadli-ska przed-karpackiego*. Rocznik Polskiego Towarzystwa Geologicznego 1963, vol. 33, nr 3, s. 289–320.
- [26] Wygrala B. P.: *Integrated study of an oil field in the southern Po Basin, Northern Italy*. PhD thesis, University of Cologne, Germany 1989.
- [27] Zajac R.: *Korelacja utworow dewonu i karbonu dolnego pod-loza srodkowej czesci zapadli-ska przedkarpackiego*. Biule-tyln Instytutu Geologicznego 1981, nr 331, s. 39–56.
- [28] Zajac R.: *Stratygrafia i rozwoj facjalny dewonu i karbonu dol-nego poludniowej czesci podloza zapadli-ska przedkarpackie-go*. Kwartalnik Geologiczny 1984, vol. 28, nr 2, s. 291–316.

Dr inż. Krzysztof SOWIŹDZAŁ  
 Adiunkt w Zakładzie Geologii i Geochemii.  
 Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
 ul. Lubicz 25A  
 31-503 Kraków  
 E-mail: sowizdzal@inig.pl



Mgr inż. Tomasz SŁOCZYŃSKI  
 Główny specjalista inżynierjno-techniczny  
 w Zakładzie Geologii i Geochemii.  
 Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
 ul. Lubicz 25A  
 31-503 Kraków  
 E-mail: sloczynski@inig.pl



Prof. nzw. dr hab. inż. Irena MATYASIK  
 Adiunkt, kierownik Laboratorium Nafty i Gazu  
 w Zakładzie Geologii i Geochemii.  
 Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
 ul. Lubicz 25A  
 31-503 Kraków  
 E-mail: irena.matyasik@inig.pl

Mgr inż. Marek STADTMÜLLER  
 Główny specjalista inżynierjno-techniczny w Zakładzie Geologii i Geochemii.  
 Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
 ul. Lubicz 25A,  
 31-503 Kraków  
 E-mail: stadtmuller@inig.pl