

## Skalowanie jedno- i dwuwymiarowych modeli ekspulsji węglowodorów według progowych nasyceń skał macierzystych

Dariusz Botor\*, Paweł Kosakowski\*\*, Jan Kuśmierk\*\*, Tomasz Maćkowski\*\*

**Scaling of one- and two-dimensional hydrocarbon expulsion models based on source rock expulsion threshold values.** Prz. Geol., 50: 72–77.

*Summary.* The reliable results of numerical expulsion modeling depend on precision of scaling petroleum system parameters. Of particular importance are adequately selected expulsion threshold values that cannot be measured experimentally. They are estimated by theoretical extrapolation data from oil relative permeability for sandstones with decreasing absolute permeability or/and Rock-Eval pyrolytical data and bitumen extraction analysis of source rocks. The expulsion efficiency depends indirectly on organic matter contents and its type, as well as on source rock permeability and generation dynamics, whereas the expulsion is determined by values of compactional overpressure, clay mineral dehydration and degree of organic matter transformations that determine the relationship between hydrocarbon fractions and their total volume. Based on these data, the examples of expulsion modeling in selected areas of the Polish sedimentary basins are shown.

**Key words:** source rock, hydrocarbon expulsion, numerical modeling, compaction, Flysch Carpathians, Lublin Trough

Zasadniczy postęp w metodach modelowania systemów naftowych opiera się m.in. na wynikach badań uzasadniających, że: generowanie i migracja węglowodorów podlega znanym procesom fizykochemicznym, możliwym do skwantyfikowania (Hermanrud, 1993). W odróżnieniu od technik rekonstruowania procesów generowania węglowodorów, stosowanych już powszechnie, modelowanie ich migracji jest zagadnieniem bardziej złożonym. Wymaga ono m.in. odpowiedniego wyskalowania interakcji systemu skała-płyn, na który oddziałują różne potencjały ciśnień i koncentracji mediów, indukowane procesami m.in.: kompaktacji, przemian fazowych i deformacji tektonicznych w warunkach zmiennych cech petrofizycznych ośrodka skalnego.

Procesem bezpośrednio powiązany z generowaniem węglowodorów jest ich ekspulsja, określana też pojęciami: migracji pierwotnej lub emigracji węglowodorów, tj. uwalnianie ciekłych i gazowych frakcji z kerogenu, a następnie ich przemieszczanie ze skał macierzystych, zwykle o niskiej przepuszczalności (< 1 mD) do skał zbiornikowych. W porównaniu z migracją wewnątrzbiornikową (tzw. wtórną) napędzaną siłami wyporu i naciśnieniami wód głębinowych — procesy ekspulsji, są mniej zrozumiałe i dyskusyjne. Z drugiej strony zróżnicowana efektywność uwalniania się wygenerowanych frakcji węglowodorowych — znajdująca potwierdzenie w analizach geochemicznych próbek dojrzałych skał macierzystych — ma istotne znaczenie dla ilościowej oceny potencjalnych „strat” w bilansie węglowodorowym każdego basenu sedimentacyjnego.

W niniejszej publikacji opisano wyniki jedno- i dwuwymiarowych modeli ekspulsji węglowodorów w kilku wybranych strefach polskich basenów sedimentacyjnych, koncentrując się na problemach skalowania tego procesu.

Modelowania jednowymiarowe przeprowadzono przy użyciu programów komputerowych Genex<sup>TM</sup> i Basin-Mod<sup>TM</sup>, bazujących na wynikach analizy pirolitycznej Rock Eval rdzeni z profili odwiertów z rejonu wschodniej części Karpat polskich oraz rowu lubelskiego na platformie prekambryjskiej. Modelowania dwuwymiarowe wykonano przy pomocy oprogramowania Landmark (program StaraModel<sup>TM</sup>)\*\*\*. Obiektem tych modeli był regionalny przekrój geologiczny jednostek ropogazono-

nych wschodniej części Karpat polskich. Miały one na celu skalowanie efektywności ekspulsji węglowodorów w aspekcie zmiennych nasyceń progowych skały macierzystej.

Opis metod i wyników modelowań jedno- i dwuwymiarowych poprzedzono wprowadzeniem odzwierciedlającym różnorodność poglądów na mechanizm migracji pierwotnej i fizyczne modele tego procesu.

### Mechanizmy pierwotnej migracji węglowodorów; fizyczne aspekty proponowanych modeli

W celu wyjaśnienia istoty procesu migracji pierwotnej były sugerowane dotychczas różnorodne mechanizmy fizyczne, opisane poniżej.

**Migracja węglowodorów w fazie rozpuszczonej w wodach porowych**, wyciskanych z osadów macierzystych wskutek kompaktacji (Magara, 1978; Hunt, 1996); w modelu tym zakłada się, że oddzielenie fazy węglowodorowej następuje w strefach niższych temperatur i ciśnień, czyli w trakcie migracji wtórnej, bądź dopiero w obrębie pułapek złożowych. Należy jednak podkreślić, że ilościowy wymiar tego procesu ogranicza stosunkowo niska rozpuszczalność węglowodorów w fazie wodnej (szczególnie w wodach silnie zmineralizowanych), a ponadto w wielu złożach nie występują wody podścielające (np. w Karpatach).

**Migracja węglowodorów w fazie gazowej**; akceptacja tego mechanizmu jest oparta na założeniu, że na dużych głębokościach (rzędu 3000 m i więcej) w gazie ziemnym mogą być rozpuszczone znaczne ilości węglowodorów ciekłych (Sokolov i in., 1963), tworząc medium określane pojęciem płynu naftowego. Tą postacią migracji też nie można uznać za dominującą, gdyż wymagałaby ona rozproszenia całej ilości gazu ze złóż mających obecnie charakter akumulacji ropnych.

**Migracja węglowodorów wskutek dyfuzji**; mechanizm ten może mieć prawdopodobnie znaczący wymiar tylko w odniesieniu do lekkich n-alkanów na krótkich dystansach rzędu 10–100 m (England i in., 1987) i jest niezdolny do efektywnego transportu mediów, aż do ich stref akumulacji (Thomas & Clouse, 1990).

**Migracja w oddzielnej fazie węglowodorowej**; zakłada się, że po przekroczeniu progowej wartości nasy-

\*Instytut Nauk Geologicznych, Polska Akademia Nauk, ul. Senacka 1, 31-002 Kraków; ndbotor@cyf-kr.edu.pl

\*\*Zakład Surowców Energetycznych, Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

\*\*\*Do modeli wykorzystano oprogramowanie firmy Landmark Graphics Corporation, udostępniony w ramach programu wspierania badań naukowych uniwersytetów (umowa nr LG 137 V 166/1419)

cenia skał macierzystych, wskutek nadciśnień wywołanych przez procesy generowania i kompaktację, następuje przemieszczanie fazy węglowodorowej w kierunku skał zbiornikowych, charakteryzujących się niższymi ciśnieniami porowymi.

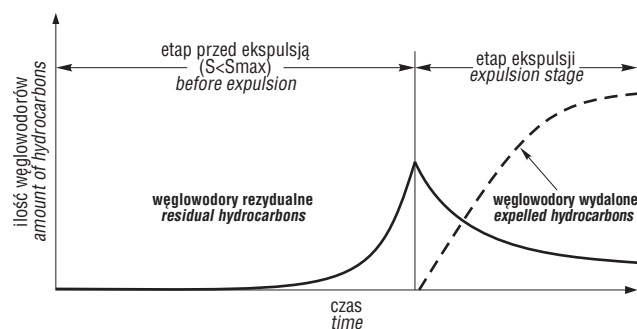
Ten ostatni mechanizm migracji jest obecnie preferowany i rozwijany w oparciu o następujące argumenty:

— większość akumulacji ropnych pochodzi ze skał macierzystych zawierających ponad 2,5% węgla organicznego, które w stadium generowania wydalają zbyt małe ilości wody, aby prześcisnąć mikroporę w fazie roztworu wodnego, gdyż ilość mobilnych wód porowych musiałaby znacznie przekroczyć objętość węglowodorów;

— w stadium ekspulsji stosunek wody mobilnej do wody związanej (fizycznie i/lub chemicznie) jest na tyle niski, że węglowodory uwalniane z kerogenu mogą tworzyć tzw. fazę wewnątrznie połączoną, na tyle dynamiczną, że może ona pokonać ciśnienia kapilarnie przestrzeni porowej w skałach macierzystych; ponadto jeżeli porowość skały macierzystej spadnie poniżej 7% — co odpowiada przeciętnej średnicy kapilary rzędu 4 nm, wówczas prawie cała zawartość wody jest związana ze strukturą skały, tj. w migracji bierze udział tylko faza węglowodorowa. Przypuszcza się, że połączona faza węglowodorowa tworzy się, gdy nasycenie węglowodorami przestrzeni porowej przekracza 10%. W strefach generowania, wskutek przemian fazowych kerogenu (jako ciała stałego) w płynną frakcję węglowodorów a następnie gazową, objętość fazy organicznej może wzrosnąć do 25%; wywołując dodatkowe nadciśnienia mogące powodować proces mikroszczelinowania lub rozwierania spękań już istniejących. Jest to prawdopodobne również z tego powodu, że frakcja ropna i gazowa przy ciśnieniach powyżej 28 MPa i temperaturze > 100°C, tworzy jednofazowy płyn węglowodorowy o dużej prężności i obniżonej lepkości;

— ponieważ ekspulsja następuje w stadium zaawansowanego generowania węglowodorów, mogą one wykorzystywać postkerogenową sieć pustek jako drogi migracji.

Powyższe argumenty leżą u podstawy ilościowych modeli migracji pierwotnej, zaproponowanych w ostatnich latach (Palciauskas, 1991; Pepper & Corvi, 1995). Pierwszy z nich przyjmuje, że przeważająca część węglowodorów podlega ekspulsji w oddzielnej fazie, pod wpływem różnicy ciśnień między szkieletem skalnym a przestrzenią porową. Przyjęty mechanizm opiera się na założeniu, że rozproszona substancja organiczna jest w istocie częścią szkieletu a nie przestrzeni porowej, co w szczególności odnosi się do bogatych skał macierzystych. W rezultacie faza węglowodorowa jest zdolna wyprzeć pozostałą wodę mobilną lub rozszczelinować skałę macierzystą, gdy jej przepuszczalność jest znikoma.



**Ryc. 1.** Model procesów ekspulsji metodą nasycenia (wg Genex Reference Manual, 1997);  $S$  — nasycenie węglowodorami skały macierzystej,  $S_{max}$  — nasycenie progowe dla rozpoczęcia ekspulsji

**Fig. 1.** Expulsion model using saturation method (Genex Reference Manual, 1997);  $S$  — source rock saturation,  $S_{max}$  — threshold saturation

Przepuszczalność skał macierzystych jest sporadycznie mierzona. Częściej wylicza się ją jako funkcję porowości, ale ilościowa relacja tej zależności może być obarczona błędem nawet rzędu wielkości mierzonej (Magara, 1978). Ekspulsja fazy ropnej przez niemieszalne wypieranie cząstek wody dominuje w skałach macierzystych o przepuszczalności >  $10^{-1}$  mD, w warunkach akomodacji szybkości generowania i uwalniania węglowodorów. Gdy nie są one spełnione powstają wysokie nadciśnienia inicjujące propagację mikroszczelin (Palciauskas, 1991). Wpływ na intensywność tego procesu ma również typ materii organicznej, ponieważ kontroluje on objętość generowanych faz węglowodorowych i ich parametry fizyczne.

Geneza rozwoju mikrospeków w ilastych skałach macierzystych — ułatwiających ekspulsję węglowodorów — może być również związane z termiczną przemianą wody związanej w postaci wody swobodnej, której towarzyszy wzrost objętości medium (Zalajew, 2000). Należy jednak podkreślić, że w profilach osadów ilastych charakteryzujących się normalnym trendem kompaktacji, ekspulsja płynów podporządkowana jest przede wszystkim gradientom hydraulicznym i ciśnieniom kapilarnym; tzn. ukierunkowana jest ku najbliższej warstwie zbiornikowej, a więc subwertykalnie. Pogląd ten wyrażony w wielu publikacjach (m.in. Magara, 1978; England, 1994) potwierdzają również eksperymentalne badania profili karpacckich formacji ropogazonośnych (Kuśmierk i in., 1991).

Nowszy model, zaproponowany w pracy Peppera i Corviego (1995) zakłada, że ekspulsja jest w istocie rezultatem dwu następujących po sobie procesów:

— uwalniania wygenerowanych węglowodorów z sieci kerogenowej, gdy ich koncentracja przekroczy zdolność sorbcyjną kerogenu rezidualnego (tj. rząd 0,1–0,2 g HC/g węgla organicznego).

— migracji pierwotnej (*sensu stricto*) jako przepływu węglowodorów przez sieć pustek szkieletu skalnego o niskiej przepuszczalności z zachowaniem reszkowych nasyceń rzędu 10%.

W konsekwencji, efektywność ekspulsji — przy założeniu dominującej roli migracji węglowodorów w postaci oddzielnej fazy — zależy pośrednio od pierwotnej zawartości materii organicznej i jej typu, a z drugiej strony od dynamiki generowania i przepuszczalności szkieletu skalnego skały macierzystej. Natomiast bezpośrednio jest warunkowana przez wartości nadciśnień wywołanych kompaktacją i dehydratacją skał ilastych oraz wielkością przemian fazy organicznej, determinujących wzajemne stosunki pomiędzy frakcjami węglowodorowymi i ich sumaryczną objętość (Palciauskas, 1991; Pepper & Corvi, 1995; Mann i in., 1997). Czynniki te mają także wpływ na straty spowodowane przez sorbcję oraz rezidualne nasycenia węglowodorami przestrzeni porowej. Mogą być one minimalizowane, gdy ciekła faza węglowodorów pozostała w skałach macierzystych, pod wpływem wzrostu paleotemperatur, podlega konwersji w fazę gazową (kraking wtórny) bardziej podatną na ekspulsję.

### Modelowania jednowymiarowe (1-D)

Jednowymiarowe modele numeryczne, konstruowane przy pomocy programów Genex<sup>TM</sup> i BasinMod<sup>TM</sup>, umożliwiają określenie czasu i wielkości ekspulsji węglowodorów, a w konsekwencji nasycenia skał macierzystych (Ungerer, 1988; Braun & Burnham, 1990; Waples, 1994). W modelach tych zakłada się, że proces ekspulsji węglowodorów następuje po przekroczeniu progowego nasycenia przestrzeni porowej skały macierzystej.

Pierwszym krokiem w modelowaniu procesów generowania i ekspulsji jest zestawienie i zinterpretowanie nie-

zbędnych danych: litostratigraficznych, termicznych, geochemicznych i petrofizycznych, dla skonstruowania przestrzenno-czasowego modelu ewolucji badanych formacji ropogazonośnych. Metody rekonstrukcji podstawowych elementów tego modelu tj. krzywej pograżania skał macierzystych, ich historii termicznej i parametrów kinetycznych kerogenu oraz ich wpływu na dynamikę procesów generowania węglowodorów opisano w publikacji Batora i Kosakowskiego (2000). Dla kalibrowania procesów ekspulsji szczególnie istotne jest natomiast odwzorowanie zmian porowatości wydzielonych pakietów skał macierzystych i estymacja ich progowych nasyceń (ryc. 1). W trakcie procesu generowania węglowodorów i ich ekspulsji następuje zmniejszenie objętości skały macierzystej, zarówno z powodu kompaktacji przestrzeni porowej, jak i wyciskaniu mediów węglowodorowych (Palciauskas, 1991).

Powyższe problemy zostały zilustrowane przykładami wyników modelowania procesów generowania i ekspulsji

węglowodorów (ryc. 2, 3), przeprowadzonych dla odwiertów Kuźmina-1 (płaszczowina skolska, Karpaty fliszowe) i Bystrzyca-2 (rów lubelski, platforma wschodnioeuropejska).

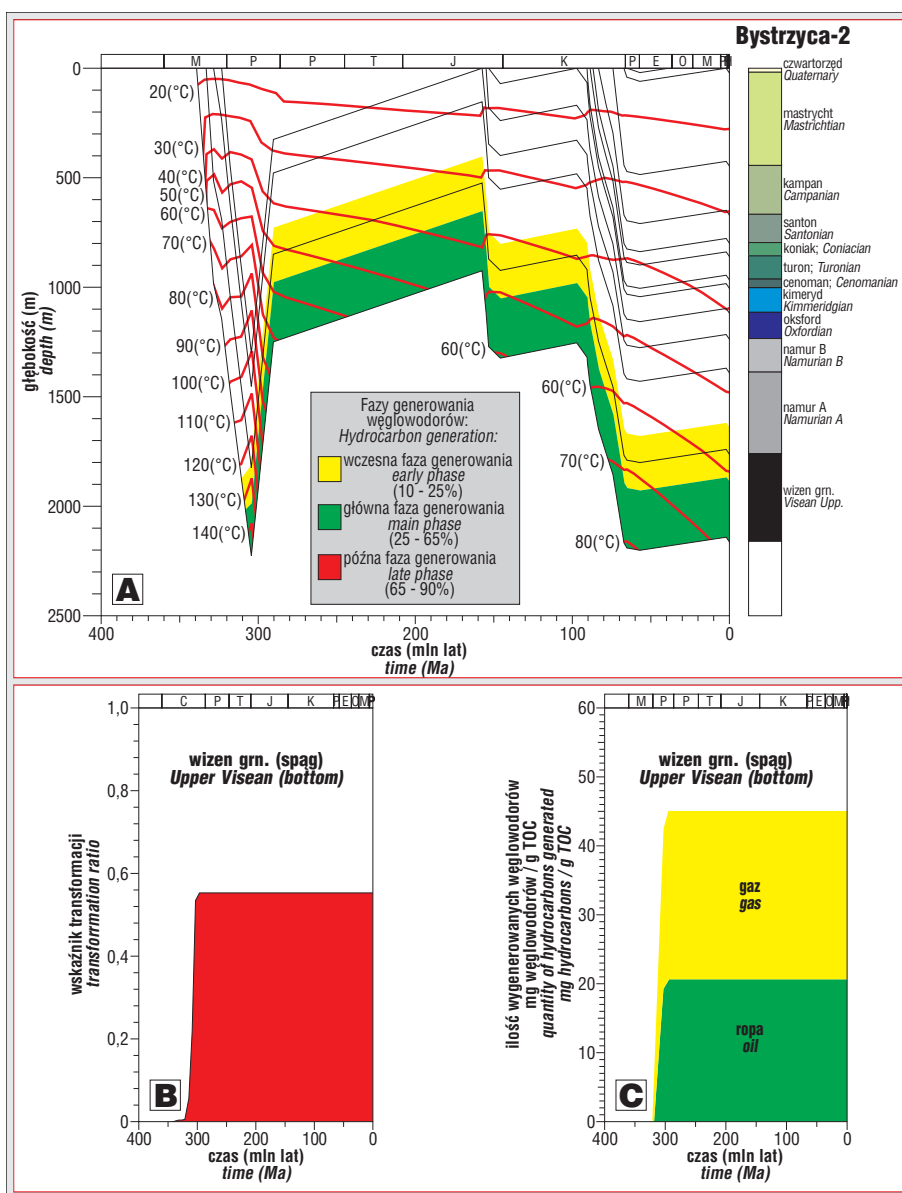
### Modelowania dwuwymiarowe (2-D)

Jedną z szeroko stosowanych metod przestrzennych modelowań procesów generowania i ekspulsji węglowodorów jest metoda otworów syntetycznych tzw. „pseudo-wells”. Polega ona na wykonaniu wielu obliczeń w wariancie jednowymiarowym dla ciągu syntetycznych profili rozmieszczonych zazwyczaj w węzłach równomiernej siatki interpolacyjnej. Krok dyskretyzacji jest uzależniony od stopnia skomplikowania geometrii struktur węglonych, zmienności parametrów geochemicznych i petrofizycznych oraz założonej rozdzielczości wyników modelowań. Ten sposób postępowania pomimo swych ograniczeń, przejętych po modelowaniach jednowymiarowych, pozwala uwzględnić zmienność parametrów i geometrii kompleksów macierzystych. W wyniku tak przeprowadzonych modelowań otrzymujemy „ciągłe”, przestrzenne (2-D lub 3-D) rozkłady symulowanych parametrów systemu naftowego.

Ideę metody otworów syntetycznych zastosowano do modelowań procesów generowania i ekspulsji węglowodorów wzdłuż regionalnego przekroju geologicznego Szczawne–Kuźmina. Przeprowadzono je dla poszczególnych bloków siatki interpolacyjnej założonej w obrębie rozpatrywanego przekroju i przeniesionej na dwuwymiarowe modele paleostrukturnalne. Modele te skonstruowane metodą przekrojów bilansowanych, miały na celu odwzorowanie geometrii fałdów i nasunięć w trzech przedziałach czasowych obejmujących wczesny oligocen do późnego miocenu. Okres ten charakteryzował się największą intensyfikacją procesów generowania i ekspulsji węglowodorów zanikającą w stadium inwersji tektonu karpackiego (Kuśmirek & Maćkowski, 1996; Kuśmirek i in., 2001).

Dla poszczególnych przedziałów czasowych odtworzono położenie elementarnego bloku siatki interpolacyjnej, uzyskując tym samym krzywą pograżania każdego z nich. Wzdłuż skonstruowanych syntetycznych krzywych pograżania przeprowadzono jednowymiarowe modelowania: stopnia transformacji kerogenu, ilości wygenerowanych węglowodorów, porowatości skał macierzystych i ostatecznie współczynnika efektywności ekspulsji.

Stopień termicznej transformacji kerogenu wyliczono na podstawie zrekonstruowanych



**Ryc. 2.** Wyniki modelowań numerycznych procesów ekspulsji dla profilu litostratigraficznego Bystrzyca-2: A — krzywe pograżania wraz z oknami ekspulsji, B — wskaźnik transformacji kerogenu, C — ilość wygenerowanych węglowodorów

**Fig. 2.** The results of numerical modeling of expulsion for well Bystrzyca-2; A — burial history with expulsion windows, B — kerogen transformation ratio, C — amount of hydrocarbons generated

gradientów paleotermicznych i parametrów kinetycznych kerogenu, specyficznych dla wydzielonych kompleksów skał macierzystych. Skały macierzyste o najwyższym potencjale genetycznym, reprezentowanym przez kerogeny typu II/I i II/III, występują w profilu litofacji łupków menilitowych (wczesny oligocen), podczas gdy w pakietach ilastych kredowo-paleoceńskich dominuje kerogen typu III (Halat, 1995; Bessereau i in., 1996).

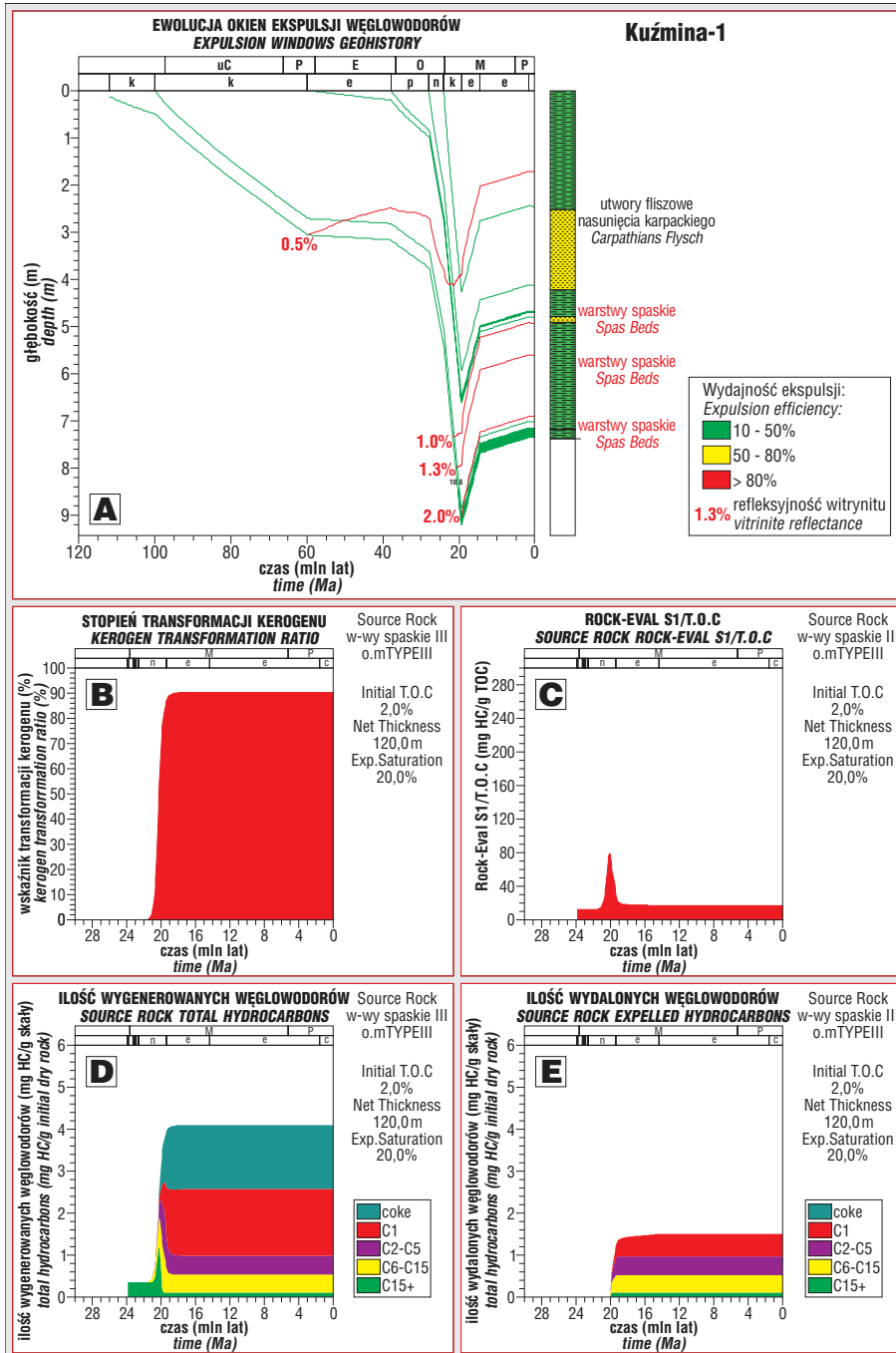
Obliczenia współczynnika ekspulsji przeprowadzono dla dwóch wartości progowego nasycenia węglowodorami przestrzeni porowej skał macierzystych:  $Sp = 0,1$  i  $0,2$  (ryc.

4A, B). Interpolacje parametrów systemu naftowego oraz obliczenia wykonano przy użyciu programu StrataModel™ firmy Landmark Graphics Corporation. Wyniki modelowań — ze względu na konieczność ograniczenia wielkości zamieszczonych rycin — przypisano nierozdzielonym kompleksom litostratygraficznym bez wyodrębniania w ich profilu, zazwyczaj cienkich, pakietów skał macierzystych.

### Analiza i dyskusja wyników modelowań

Wyniki jednowymiarowych modelowań procesów generowania i ekspulsji węglowodorów ilustrują ryc. 2 i 3.

Modelowania dla utworów karbonu w odwiercie Bystrzyca-2, znajdującym się w obszarze rowu lubelskiego przeprowadzono przy pomocy oprogramowania BasinMod™. Odwiert ten, poniżej osadów kredy i jury, przewiercił w przedziale głęb. 1235,0–2159,5 m klastyczne utwory węglonośne karbonu górnego oraz węglanowe wizenu górnego. Dojrzałość utworów karbonu dolnego, w którym występuje kerogen II i III typu jest na poziomie 0,9–1,0% w skali refleksyjności wityrnytu. Dojrzałość utworów karbonu górnego, gdzie dominuje III typ kerogenu jest na poziomie 0,7–0,8% Ro (ryc. 2A). Obliczony wskaźnik transformacji kerogenu sięga dla poziomów macierzystych karbonu górnego 14%, a dla II typu kerogenu w poziomie karbonu dolnego nawet 99% (ryc. 2B). Powyższe dane wskazują, że w utworach karbońskich nastąpił proces generowania węglowodorów. Całkowita ilość węglowodorów wygenerowanych przez skały macierzyste karbonu górnego wyniosła 65,5 mg HC na gram skały, a dla poziomów skał macierzystych karbonu dolnego ok. 405 mg HC na gram skały (ryc. 2C). Jednak proces ekspulsji wygenerowanych węglowodorów jest ograniczony co powyżej do poziomu skał macierzystych karbonu dolnego, gdzie wyliczona wielkość węglowodorów wydanych może wynieść do 50% potencjału generacyjnego, przy założeniu 5% proggu nasycenia. Brak ekspulsji z utworów górnokarbońskich, potwierdzony m.in. stosunkiem wskaźnika S1/TOC wynoszącym zero, jest wynikiem przede wszystkim zawartości III typu kerogenu. Przykłady modelowania przeprowadzonego w dwóch odmiennych regionach wykazały, jak istotne jest, nie tylko modelowanie procesów generowania węglowodorów, ale również i ich ekspulsji.



**Ryc. 3.** Wyniki modelowań numerycznych procesów ekspulsji dla profilu litostratygraficznego Kuźmina-1; A — krzywe pograżania wraz z oknami ekspulsji, B — wskaźnik transformacji kerogenu, C — ilość wygenerowanych węglowodorów, D — wskaźnik S1/TOC, E — ilość węglowodorów podlegających ekspulsji z poziomów macierzystych

**Fig. 3.** The results of numerical modeling of expulsion for well Kuźmina-1; A — burial history with expulsion windows, B — kerogen transformation ratio, C — amount of hydrocarbons generated, D — indices S1/TOC, E — amount of hydrocarbons expelled from source rocks

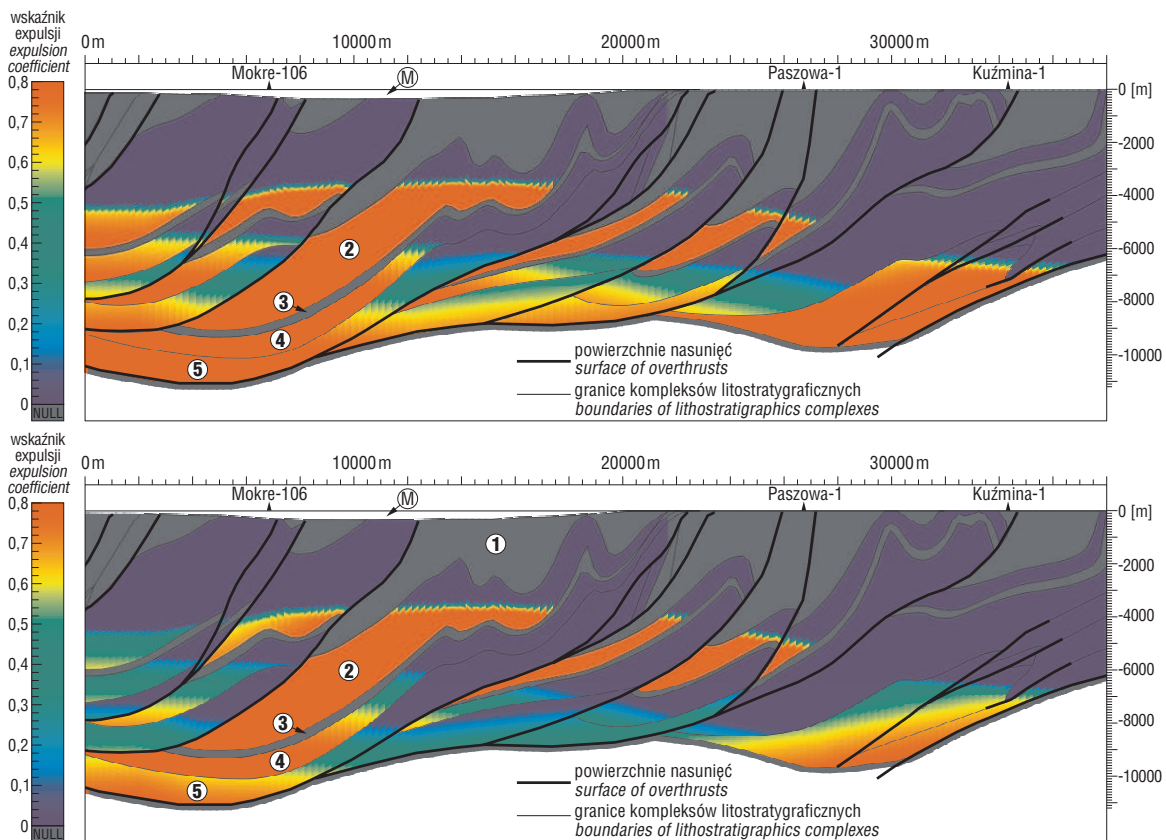
Modelowania procesów generowania i ekspulsji węglowodorów wykonane dla odwiertu Kuźmina-1 za pomocą oprogramowania Genex™, pozwoliły na wydzielenie w jego profilu litostratygraficznym dojrzałych poziomów skał macierzystych w obrębie warstw spaskich (ryc. 3). Odwiert ten, poniżej osadów kredy młodszej–oligoceenu, przewiercił w interwale głęb. 4740–6885 sfałdowane i nasunięte utwory kredy starszej, reprezentowane przez litofację piaskowców i łupków spaskich wieku apt–alb. Budują one jądra trzech wgłębnych łusek tektonicznych. Dojrzałość pierwszego, najpłycej zalegającego, kompleksu warstw spaskich jest na poziomie 0,7–0,8% w skali refleksyjności witrinitu (% Ro), drugiego 0,9–1,1%, a trzeciego przekracza 1,3% Ro (ryc. 3A). Wyliczony wskaźnik transformacji kerogenu sięga nawet 90% (ryc. 3B). Pozwala to sądzić, że co najmniej w trzecim, najgłębiej zalegającym kompleksie warstw spaskich procesy ekspulsji węglowodorów zostały zainicjowane. Całkowita ilość wygenerowanych węglowodorów przekroczyła 4 mg HC na gram skały (ryc. 3C). Stosunek wskaźnika S1 do TOC — wyznaczony z analizy Rock-Eval — osiągnął maksimum (80 mg HC/g węgla organicznego) ok. 20 milionów lat temu (ryc. 3D), co wskazuje na zainicjowanie procesu ekspulsji węglowodorów w trzecim kompleksie warstw spaskich. Analiza ilościowa tego procesu wykazała, że wydaleni uległo jedynie 1,4 mg HC na gram skały (ryc. 3E).

Jak to zilustrowano na ryc. 4, modelowania dwuwymiarowe umożliwiły okonturowanie stref ekspulsji węglowodorów w przekroju Szczawne–Kuźmina. Wykazują one charakterystyczny układ geometryczny, tj. są zlokalizowane w głęboko pogrążonych elementach synklijalnych,

zalegających w podłożu lokalnych nasunięć tektonicznych. Takie rozmieszczenie stref ekspulsji wskazuje na rozczłonkowanie systemu migracji węglowodorów w obrębie poszczególnych jednostek tektoniczno-facjalnych wyższego rzędu na integralne moduły strukturalne (łuski i systemy fałdów).

Należy również podkreślić zróżnicowaną głębokość i krzywoliniowy kontur zalegania stropu stref ekspulsji, co jest warunkowane z jednej strony zróżnicowaną historią pogrążania poszczególnych elementów strukturalnych, a z drugiej zmiennością parametrów paleotermicznych i geochemicznych w płaszczyźnie analizowanego przekroju. Ponadto obserwuje się zróżnicowanie stopnia efektywności ekspulsji dla wydzielonych poziomów macierzystych w obrębie okonturowanych stref, spowodowane wyżej wymienionymi czynnikami, np. starsze kompleksy macierzyste (wieku kredowego) wykazują niższy stopień zaawansowania procesów ekspulsji.

Istotne konsekwencje dla modelowanej geometrii stref ekspulsji i ilości węglowodorów przemieszczanych do poziomów zbiornikowych miało przyjęcie takiej, a nie innej wartości progowego nasycenia ( $S_p$ ). Arbitralne ustalenie tej wartości jest trudne do merytorycznego uzasadnienia. W konsekwencji model na ryc. 4A przedstawia bardziej optymistyczną interpretację ilościową niż wersja alternatywna prezentowana na ryc. 4B. Wersja pierwsza ( $S_p = 0,1$ ) byłaby bardziej zbliżona do rzeczywistości w przypadku generowania lżejszych frakcji węglowodorowych o niższej lepkości, natomiast wersja druga ( $S_p = 0,2$ ) odpowiadałaby emigracji cięższych rop o większej lepkości.



**Ryc. 4.** Wyniki modelowań numerycznych procesów ekspulsji dla przekroju geologicznego Mokre 106–Kuźmina 1; A — dla  $S_p = 0,1$ , B — dla  $S_p = 0,2$ ; M — miocen transgresywny, 1 — kompleks nadjasielski, 2 — kompleks podjasielski, 3 — osady eocenu, 4 — osady paleocenu–kredy młodszej, 5 — osady kredy starszej, 6 — powierzchnie nasunięć

**Fig. 4.** The results of numerical modeling of expulsion for cross-section Mokre 106–Kuźmina 1; A — for  $S_p = 0,1$ , B — for  $S_p = 0,2$ ; M — Miocene, 1 — Supra-Jasło complex, 2 — Sub-Jasło complex, 3 — Eocene sediments, 4 — Paleocene–Late Cretaceous sediments, 5 — Early Cretaceous sediments, 6 — surface of overthrusts

Zróźnicowanie wartości współczynnika ekspulsji, zależności od przyjętego progu nasycenia, występuje przede wszystkim w strefach charakteryzujących się mniejszą objętością wygenerowanych węglowodorów, determinującą nasycenie skał macierzystych. Dotyczy to starszych kompleksów skał macierzystych o niższym potencjale genetycznym (III typ kerogenu) w odróżnieniu od najmłodszego kompleksu reprezentowanego przez litofację łupków menilitowych o najwyższej koncentracji węgla organicznego i najlepszym typie kerogenu.

### Podsumowanie

Uzyskanie wiarygodnych wyników modelowań jest ściśle związane z dokładnością skalowania parametrów wymiarujących system naftowy. Szczególnie istotnym jest problem doboru progowego nasycenia, mający bezpośrednio wpływ na szacowaną efektywność ekspulsji ciekłej fazy węglowodorów, bądź też — w przypadku skał macierzystych o niskim potencjale genetycznym i przeobrażeniu termicznym — determinujący inicjację tego procesu.

Problem ten jest szeroko dyskutowany w odnośnej literaturze specjalistycznej, również i z tego powodu, że wartości progowego nasycenia nie można wyznaczyć eksperymentalnie. Próbuje się ją szacować na drodze rozważań teoretycznych poprzez ekstrapolację przepuszczalności względnych fazy ropnej dla piaskowców o malejącej porowatości absolutnej (Okui & Waples, 1993), lub poprzez analizę danych pirolitycznych i wyników ekstrakcji próbek skał macierzystych.

Wpływ lepkości wygenerowanych węglowodorów, a tym samym typu kerogenu i stopnia jego przeobrażenia, na wielkość progowego nasycenia jest oczywisty. Węglowodory o mniejszej lepkości wymagają mniejszego nasycenia szkieletu skalnego (Palciauskas, 1991). W rezultacie wielkość progowego nasycenia szacowana jest w bardzo szerokim zakresie: od 0,05 do 0,25, a nawet do 0,5.

Jak już wspomniano, bardzo istotnym parametrem wpływającym na dokładność obliczeń współczynnika efektywności ekspulsji jest porowatość skały macierzystej. Zmienia się ona od 50–60% w strefie przypowierzchniowej do ok. 5% dla głęboko pogrążonych kompleksów macierzystych. Zazwyczaj jest ona szacowana na podstawie krzywych kompaktacji. Zagadnienie to komplikuje się w warunkach anomalnych trendów kompaktacji występujących w zamkniętych układach hydrodynamicznych (częstych np. w Karpatach), które z kolei inicjują powstawanie mikroszczelin ułatwiających migrację pierwotną węglowodorów.

Z drugiej strony, wybór conceptualnego modelu ekspulsji i symulującego go algorytmu numerycznego może mieć większe znaczenie niż cyzelowanie wartości progowych nasycień. Odnieść to należy do uwzględnienia szeregu czynników fizykochemicznych mających wpływ na efektywność ekspulsji, opisanych we wstępie. Uzyskane rozwiązania — pomimo wielu zagadnień dyskusyjnych wymagających dalszych badań — wnoszą istotny postęp w metodach regionalnej prospekcji naftowej analizowanych stref.

Niniejsza publikacja jest oparta na wynikach uzyskanych w trakcie realizacji tzw. badań statutowych (temat nr 11.140.570 — Kuśmerek, Kosakowski, Maćkowski, 1997) i prac własnych (temat nr 10.10.140.335 — Botor, 1998) wykonanych w

Zakładzie Surowców Energetycznych na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH.

### Literatura

- BESSEREAU G., ROURE F., KOTARBA M., KUŚMIEREK J. & STRZETELSKI W. 1996 — Structure and hydrocarbon habitat of the Polish Carpathians. [W:] Zigler P.A., Horvath F., Peri-Tethys Memoir 2: Structure and Prospects of Alpine Basins and Forelands. Mem. Mus. Nat. Hist. Nat., 170: 170–191.
- BOTOR D. 1998 — Procesy generowania i ekspulsji węglowodorów w utworach młodszego paleozoiku w rejonie Bystrzycy (rów lubelski). Arch.WGGiOŚ AGH.
- BOTOR D. & KOSAKOWSKI P. 2000 — Zastosowanie modeli numerycznych do rekonstrukcji paleotemperatur i procesów generowania węglowodorów. Prz. Geol., 48: 154–161.
- BRAUN R.L. & BURNHAM A.K. 1990 — Mathematical model of oil generation, degradation and expulsion. Energy Fuels, 4: 132–146.
- ENGLAND W.A. 1994 — Secondary migration and accumulation of hydrocarbons. [W:] L.B. Magoon, W.G. Dow (red.), The Petroleum System: from source to trap. AAPG Mem., 60: 211–219.
- ENGLAND W.A., MACKENZIE A.S., MANN D.M. & QUIGLEY T.M. 1987 — The movement and entrapment of petroleum fluids in the subsurface. Jour. Geol. Soc. London, 144: 327–347.
- HALAT Z. 1995 — Rekonstrukcja pierwotnego potencjału macierzystości. [W:] Kuśmerek J. (red.), Ewolucja a ropogazoność Karpat polskich. Pr. Geol. PAN, 138: 111–132.
- HERMANRUD C. 1993 — Basin modelling techniques: an overview. [W:] Dore i in. (red.), Basin modelling: advances and applications. Elsevier, Amsterdam: 1–34.
- HUNT J.M. 1996 — Petroleum Geochemistry & Geology, (2 wyd.). New York.
- KUŚMIEREK J., MRUK J. & WYPYCH L. 1991 — Wpływ piaskowców na kompaktację osadów ilastych w profilach serii ropogazonośnych fliszu karpackiego. Tech. Posz. Geol., Geos. Geotr., 3–4: 17–28.
- KUŚMIEREK J. & MAĆKOWSKI T. (red.) 1996 — Dwuwymiarowe modelowanie procesów migracji węglowodorów: testowanie dynamiki napętnienia pułapek złożowych z zastosowaniem stacji interpretacyjnej „Landmark”. Blok V, etap III w temacie pn. Ocena zasobów prognozy stycznych polskich Karpat Fliszowych na tle budowy geologicznej i potencjału węglowodorowego karpackich jednostek. Arch. Biura Geol. Geonafta PGNiG, W-wa.
- KUŚMIEREK J., KOSAKOWSKI P. & MAĆKOWSKI T. (red.) 1997 — Skalowanie procesów ekspulsji węglowodorów. Sprawozd. z badań statutowych nr 11.140.570. Arch.WGGiOŚ AGH.
- KUŚMIEREK J., MAĆKOWSKI T. & ŁAPINKIEWICZ A.P. 2001 — Wpływ synsedymacyjnych nasunięć i fałdowań na wyniki dwuwymiarowych modeli generowania węglowodorów w obszarze wschodniej części Karpat polskich. Prz. Geol., 49: 412–417.
- MAGARA K. 1978 — Compaction and fluid flow. Elsevier, Amsterdam.
- MANN U., HANTSCH T., SCHAEFER R.G., KROSS B., LEYTHAEUSER D., LITTKER R. & SACHSENHOFER R.F. 1997 — Petroleum migration: mechanisms, pathways, efficiencies and numerical simulation. [W:] Welte D.H., Horsfield B. & Baker D.R. (red.), Petroleum and Basin Evolution. Springer: 403–520.
- OKUI A. & WAPLES D. 1993 — Relative permeabilities and hydrocarbon expulsion from source rocks. [W:] Dore i in. (red.), Basin modelling: advances and applications. Elsevier, Amsterdam: 293–302.
- PALCIAUSKAS V.V. 1991 — Primary Migration of Petroleum. [W:] Treatise of Petroleum Geology, Handbook of Petroleum Geology, R.K. Merrill (red.), Part I: 123–147.
- PEPPER A.S. & CORVI P.J. 1995 — Marine and Petroleum. Geol., 12: 291–319.
- SOKOLOV V.A., ZHURE T.P., VASSOEVIH N.B., ANTONOV P.L., GRIGORYEV G.G. & KOZLOV V.P. 1963 — Migration processes of gas and oil, their intensity and directionality. Paper presented at 5<sup>th</sup> World Petroleum Congress, 19–26.06, Frankfurt.
- THOMAS M.M. & CLOUSE J.A. 1990 — Primary migration by diffusion through kerogen. Geochim. Cosmochim. Acta, 54: 2793–2797.
- UNGERER P., BEHAR M., VILLALBA O.R. & AUDIBERT A. 1988 — Kinetic modelling of oil cracking. Organ.Geochem., 13: 857–868.
- WAPLES D. 1994 — Maturity modelling — thermal indicators, hydrocarbon generation, oil cracking. [W:] L.B. Magoon & W.G. Dow (red.) Petroleum System: from source to trap. AAPG Mem., 60: 285–306.
- ZALAJEW N. 2000 — Rola wody związanej w powstawaniu kolektorów szczelinowatych oraz ekspulsji ropy ze skał macierzystych. Pr. IGNiG, 110: 20–41.