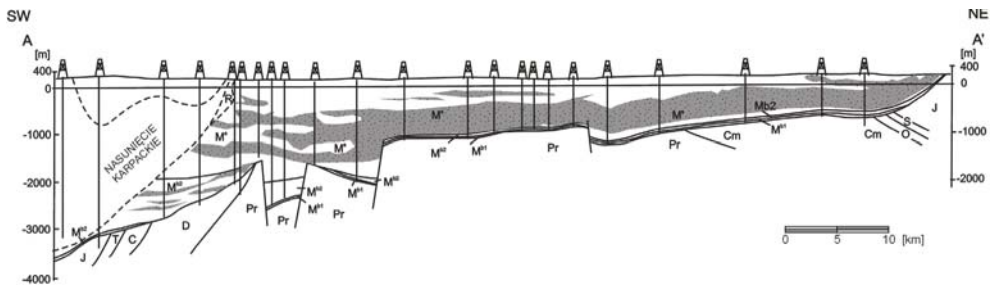


Ludwik Zawisza*

**HYDRODYNAMICZNE MODELOWANIE
PROCESU MIGRACJI I AKUMULACJI WĘGLOWODORÓW
W BASENIE NAFTOWYM
ZAPADLIKA PRZEDKARPACKIEGO****

1. WSTĘP

Zapadlisko przedkarpackie, będące rowem przedgórskim powstałym u czoła nasuwających się ku północy Karpat, jest najmłodszą jednostką alpejską na obszarze Polski [3]. Zapadlisko przedkarpackie jest wypełnione osadami molasowymi miocenu. Tworzy je zespół nawzajem przeławiacających się piaskowców, mułowców i iłowców. Osady miocenijskie mają na terenie Polski miąższość do 3500 m (wiercenie Kalników) i cechują się dużym zróżnicowaniem litologicznym. Sekwencje profilu, gdzie dominują piaskowce i zapiaszczone mułowce, tworzą oddzielne horyzonty gazonośne. Ich ilość w poszczególnych profilach odkrytych złóż gazowych waha się od kilku do 24 na polu gazowym Przemysł-Jaksmanice (rys. 1). Zdaniem autora, basen naftowy zapadliska przedkarpackiego kryje jeszcze w sobie pewne perspektywy poszukiwawcze



Rys. 1. Przekrój geologiczny przez zapadlisko przedkarpackie: R – jednostka stębnicka, Ms – sarmat, Mb – baden, Cr – kreda, J – jura, T – trias, C – karbon, D – dewon, S – sylur, O – ordowik, Cm – kambr, Pr – prekambr

* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

** Praca wykonana w ramach badań własnych Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH w 2007 roku

W pracy przedstawiono wyniki hydrodynamicznego modelowania procesu migracji i akumulacji węglowodorów w basenie naftowym zapadliska przedkarpackiego. Dane dotyczące rozkładu pola hydrodynamicznego, prędkości filtracji oraz zmian chemizmu wód podziemnych posłużyły do wyznaczenia stref perspektywicznych dla występowania złóż gazu ziemnego.

2. HYDRODYNAMICZNA KLASYFIKACJA BASENÓW NAFTOWYCH

Opierając się na danych dotyczących ciśnień i właściwości płynów złożowych, H. Coustau i in. [1] wydzilił trzy główne typy basenów osadowych:

- 1) młody (odśrodkowy),
- 2) przejściowy (dośrodkowy),
- 3) dojrzały (statyczny).

Zjawiska fizyczne oraz związki zachodzące pomiędzy nagromadzeniami węglowodorów a towarzyszącymi im wodami złożowymi i ciśnieniami predysponują typ pierwszy, a praktycznie eliminują jako nieperspektywiczny dla występowania węglowodorów trzeci typ basenu [1, 4, 5].

Podstawą klasyfikacji hydrodynamicznej basenów naftowych według H. Coustau i in. [1] są procesy różnicujące fazę płynną, a zwłaszcza czynniki związane z ruchem płynów złożowych. Zdefiniowanie typu basenu naftowego polega na określeniu, w jakim stadium rozwoju znajduje się on aktualnie: przed, w trakcie czy po inwazji wód infiltracyjnych.

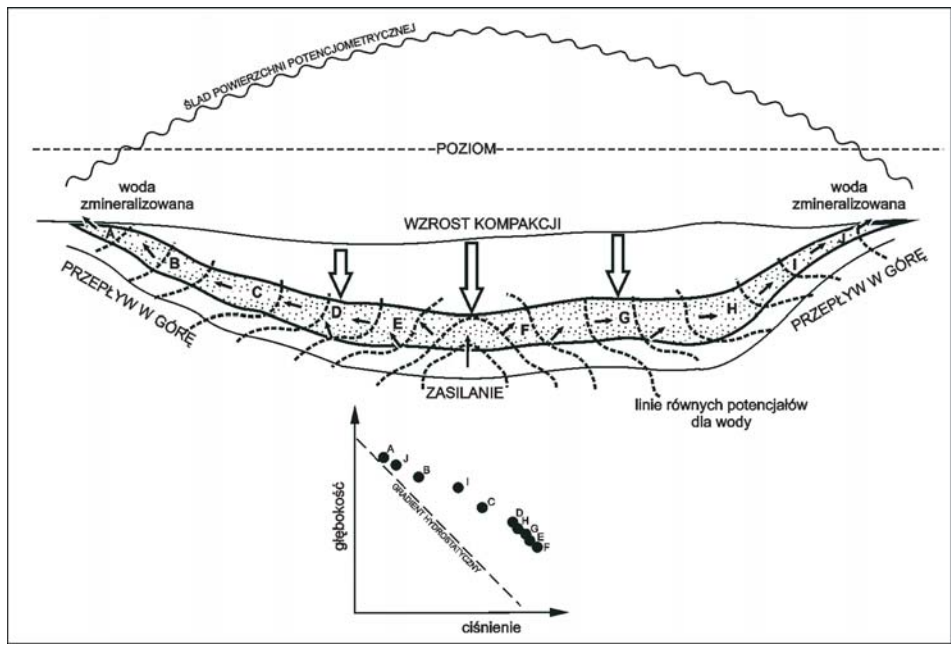
E.C. Dahlberg [2] przedstawił podobną klasyfikację hydrodynamiczną basenów naftowych, przy czym jako dodatkowe kryterium przyjął charakterystykę gradientów ciśnień złożowych. Wydzielił on cztery typy basenów, a mianowicie (rys. 2–5):

- 1) młody,
- 2) przejściowy,
- 3) stary,
- 4) asymetryczny.

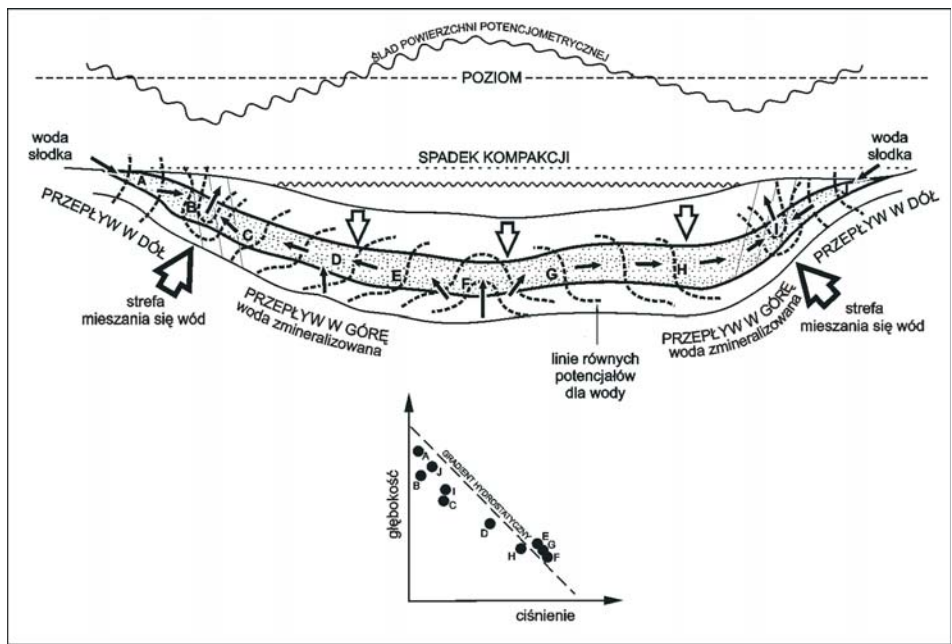
Basen młody, przedstawiony na rysunku 2, jest basenem o wysokiej perspektywiczności dla występowania złóż węglowodorów. Kierunki przepływu wód w głębszych są odśrodkowe, gradienty ciśnień złożowych są podwyższone.

Basen przejściowy, przedstawiony na rysunku 3, jest basenem w zaawansowanym stadium rozwoju hydrodynamicznego. Basen ten posiada wysoką, ale mniejszą perspektywiczność niż basen młody. W części centralnej basenu kierunki przepływu wód w głębszych są odśrodkowe, natomiast w obrębie skrzydeł kierunki przepływu wód są dośrodkowe. Gradienty ciśnień złożowych są w przybliżeniu równe gradientowi ciśnienia hydrostatycznego, przy czym w części centralnej basenu gradienty ciśnień złożowych są wyższe od hydrostatycznych, natomiast w obrębie skrzydeł basenu osadowego gradienty ciśnień złożowych są niższe od gradientów ciśnienia hydrostatycznego.

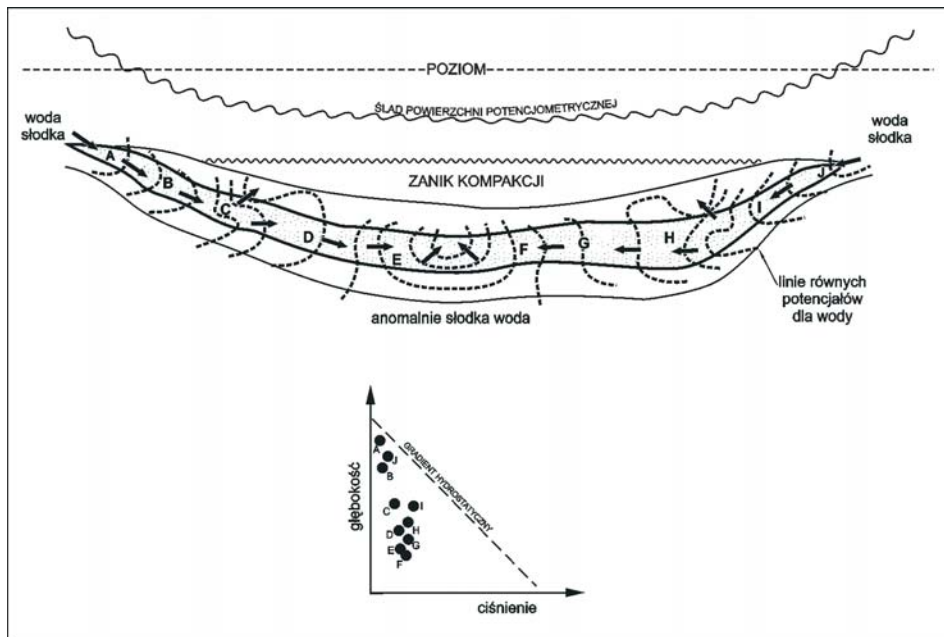
Basen stary, przedstawiony na rysunku 4, jest basenem będącym w końcowym stadium rozwoju hydrodynamicznego. Kierunki przepływu wód w głębszych są dośrodkowe, gradienty ciśnień złożowych są niższe od gradientu ciśnienia hydrostatycznego.



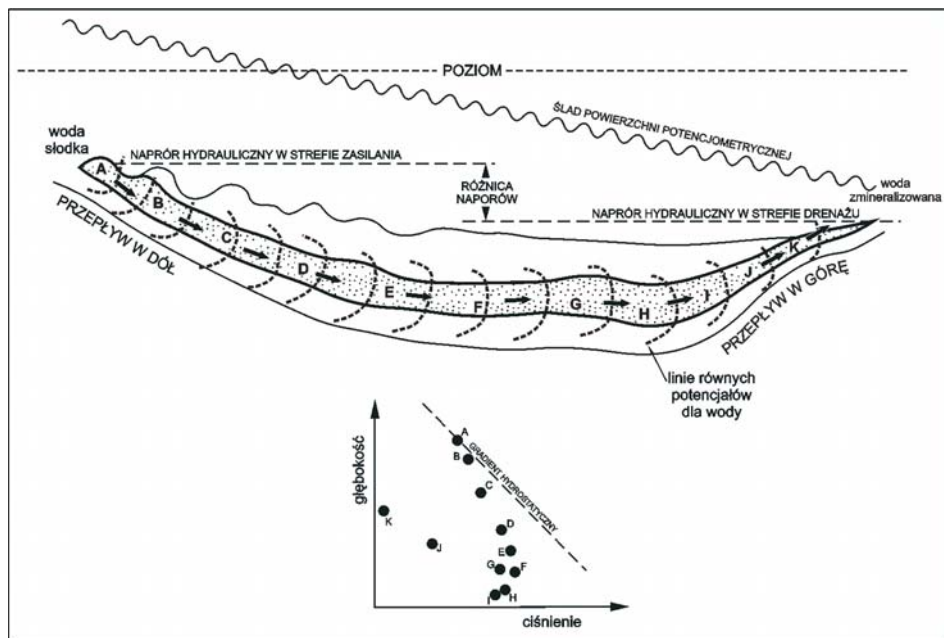
Rys. 2. Basen młody [2]



Rys. 3. Basen przejściowy [2]



Rys. 4. Basen stary [2]



Rys. 5. Basen asymetryczny [2]

Basen asymetryczny, przedstawiony na rysunku 5, jest basenem wykazującym „tektoniczne przechylenie”. Kierunki przepływu wód głębszych skierowane są od strefy zasilania do strefy drenażu, gradienty ciśnień złożowych są niższe od gradientu ciśnienia hydrostatycznego.

Basen stary oraz basen asymetryczny posiadają znacznie mniejszą perspektywiczność jak basen młody oraz basen przejściowy.

3. METODYKA BADAŃ HYDRODYNAMICZNYCH

Na potrzeby modelowania hydrodynamicznego basenów naftowych opracowano specjalną metodykę [4, 5] polegającą na wykonaniu kilkunastu map, które dają pełny komplet informacji niezbędnych dla prowadzenia prac poszukiwawczych i obejmują:

- Mapy strukturalne poziomów wodo-ropo-gazonośnych $z(x, y)$.
- Mapy izopachytowe poziomów wodo-ropo-gazonośnych $m(x, y)$.
- Mapy parametrów zbiornikowych poziomów wodo-ropo-gazonośnych, m.in. mapy współczynnika filtracji $K_{ws}(x, y)$.
- Mapy mineralizacji wód złożowych poziomów wodo-ropo-gazonośnych $M(x, y)$.
Mapy współczynników hydrochemicznych, m.in.: rNa/rCl ; $rSO_4/100/rCl$; Cl/Br .
- Mapy potencjometryczne wód złożowych w przeliczeniu na słup wody słodkiej $H_{ws}(x, y)$.
Zagadnienie rozkładu powierzchni potencjometrycznej wód głębszych sprowadza się do rozwiązania uogólnionego równania Laplace’a, które dla środowiska heterogenicznego o zmiennej mineralizacji wód złożowych oraz dla przepływu ustalonego, dwuwymiarowego będzie miało postać [4]

$$\nabla(K_{ws}\nabla H_{ws}(x, y)) = 0 \quad (1)$$

Warunkami brzegowymi dla rozwiązania powyższego równania są wartości potencjału H_{ws} wyznaczone w otworach wiertniczych według wzoru

$$H_{ws} = z + p/\gamma_{ws} \quad (2)$$

gdzie:

- γ_{ws} – ciężar właściwy wody słodkiej [N/m^3];
- p – ciśnienie złożowe [Pa];
- z – wysokość położenia punktu pomiaru ciśnienia złożowego w stosunku do poziomu morza [m].

- Mapy bezwzględnych wartości gradientów naporów hydraulicznych wód złożowych $\bar{I}(x, y)$ skonstruowane przy wykorzystaniu odpowiednich map potencjometrycznych zgodnie z formułą

$$|\bar{I}(x, y)| = |\nabla H_{ws}(x, y)| \quad (3)$$

- Mapy bezwzględnych wartości prędkości filtracji wód złożowych $\bar{v}(x, y)$ zdefiniowane równaniem

$$|\bar{v}(x, y)| = |K_{ws}(x, y) \nabla H_{ws}(x, y)| \quad (4)$$

- Mapy potencjalnych pułapek hydrodynamicznych dla ropy naftowej $H_r(x, y)$ i gazu ziemnego $H_g(x, y)$. Do kartograficznego wyznaczania lokalizacji pułapek hydrodynamicznych dla ropy i gazu służą następujące równania [4, 5]:

$$H_r(x, y) = H_{ws}(x, y) - z(x, y) \frac{\gamma_w(x, y) - \gamma_r(x, y)}{\gamma_{ws}} \quad (5)$$

$$H_g(x, y) = H_{ws}(x, y) - z(x, y) \frac{\gamma_w(x, y) - \gamma_g(x, y)}{\gamma_{ws}} \quad (6)$$

gdzie:

H_{ws}, H_r i H_g – potencjały dla wody, ropy i gazu, wyrażone w metrach słupa wody słodkiej;

γ_w – ciężar właściwy wody w warunkach złożowych [N/m^3];

γ_r – ciężar właściwy ropy w warunkach złożowych [N/m^3];

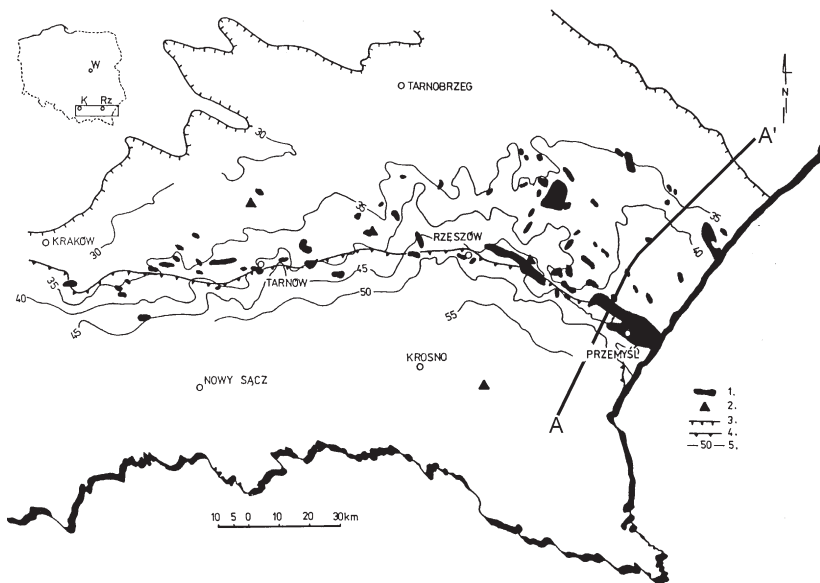
γ_g – ciężar właściwy gazu w warunkach złożowych [N/m^3].

4. REZULTATY HYDRODYNAMICZNEGO MODELOWANIA BASENU ZAPADLIKA PRZEDKARPACKIEGO POD KĄTEM OCENY PERSPEKTYW NAFTOWYCH

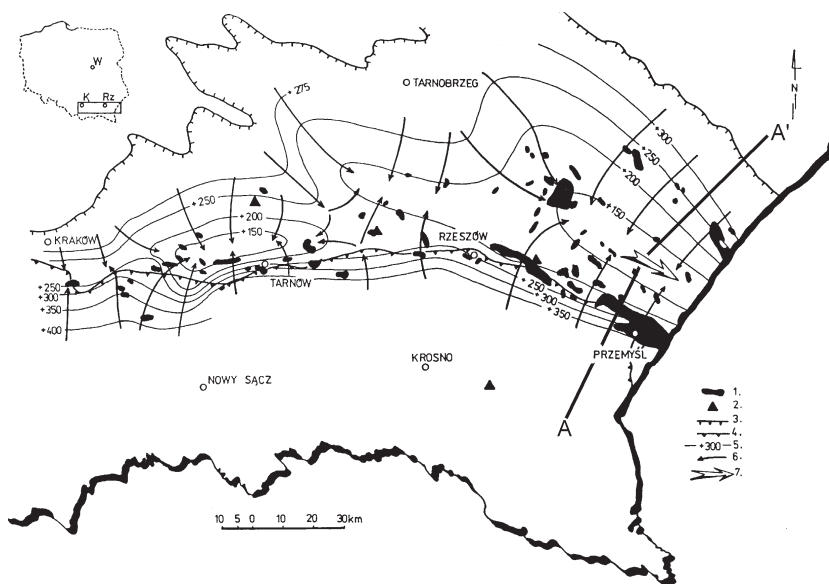
W ramach prowadzonych badań i analiz hydrodynamicznych dla utworów miocenu zapadliska przedkarpackiego wykonano:

- mapy strukturalne,
- mapy przepuszczalności,
- mapy mineralizacji (rys. 6),
- mapy współczynników hydrochemicznych,
- mapy potencjometryczne (rys. 7),
- mapy równych prędkości filtracji dla wody (rys. 8),
- mapy pułapek hydrodynamicznych dla gazu oraz opracowano przekroje hydrogeologiczne (rys. 9).

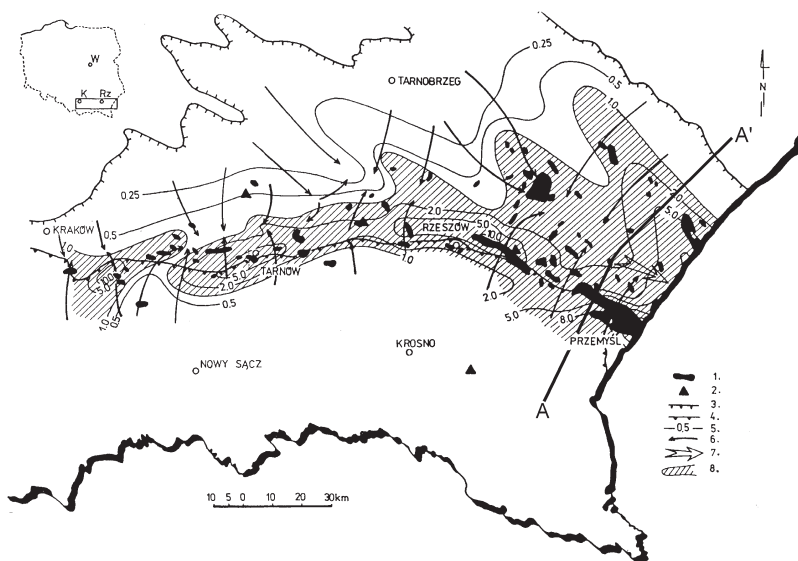
Wody formacyjne występujące w utworach miocenu autochtonicznego zapadliska przedkarpackiego mają zmienną mineralizację w granicach od 20 do 250 g/dm^3 . Średnia mineralizacja wód złożowych w nadanhydrytowym kompleksie waha się w granicach od 30 do około 60 g/dm^3 , przy czym obserwuje się spadek mineralizacji w kierunku północnym, tj. w kierunku wychodni utworów mioceńskich (rys. 6). Wiąże się to z wysłodzeniem zbiornika mioceńskiego przez wody infiltracyjne płynące od północy, od wychodni mioceńskich. Liczne złoża gazu ziemnego występują w strefach o podwyższonej mineralizacji.



Rys. 6. Mapa mineralizacji wód złożowych w miocenie autochtonicznym zapadliska przedkarpackiego: 1 – złożo gazu ziemnego, 2 – podziemny magazyn gazu, 3 – zasięg miocenu autochtonicznego, 4 – brzeg Karpat, 5 – linie równych wartości mineralizacji (g/dm^3)



Rys. 7. Mapa potencjometryczna wód złożowych w miocenie autochtonicznym zapadliska przedkarpackiego: 1 – złożo gazu ziemnego, 2 – podziemny magazyn gazu, 3 – zasięg miocenu autochtonicznego, 4 – brzeg Karpat, 5 – izolinie powierzchni potencjometrycznej wód złożowych, 6 – kierunki przepływu wód podziemnych (linie prądu), 7 – główna oś drenażu wód podziemnych



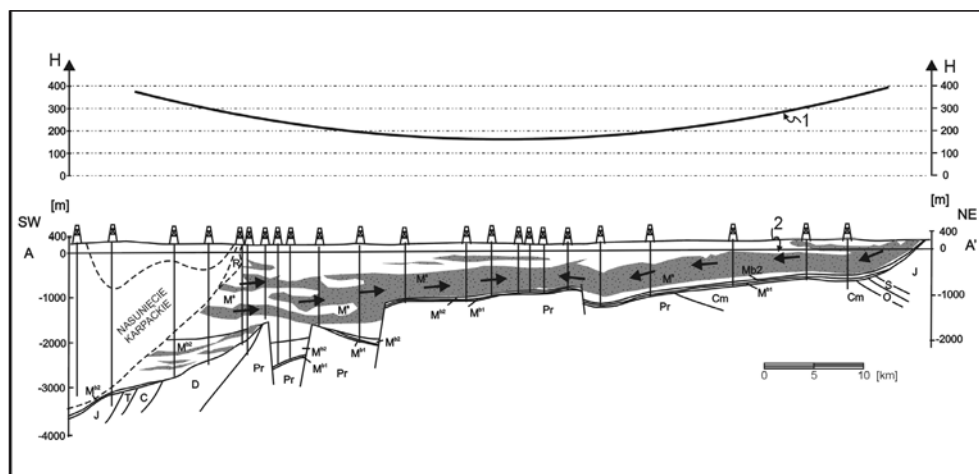
Rys. 8. Mapa wartości bezwzględnych równych prędkości filtracji wody w utworach miocenu autochtonicznego zapadliska przedkarpackiego: 1 – złożo gazu ziemnego, 2 – podziemny magazyn gazu, 3 – zasięg miocenu autochtonicznego, 4 – brzeg Karpat, 5 – linie równych wartości prędkości filtracji (cm/rok), 6 – kierunki przepływu wód podziemnych (linie prądu), 7 – główna oś drenażu wód podziemnych, 8 – strefy korzystne dla akumulacji węglowodorów

Mapa potencjometryczna wód złożowych w profilu utworów miocenu autochtonicznego została przedstawiona na rysunku 7. Mapa ta przedstawia rozkład pola hydrodynamicznego oraz kierunki przepływu wód złożowych w utworach miocenu, ponadto strefy zasilania i drenażu. Wartości naporów hydraulicznych w utworach miocenu zmieniają się od 150 do około 400 m słupa wody słodkiej nad poziom morza. Wody podziemne w północnej części zapadliska przedkarpackiego płyną z północy (od wychodni miocenu) na południe, natomiast w części południowej z południa (tzn. spod Karpat) na północ. Następnie wody te łączą się ze sobą i płyną główną osią zapadliska w kierunku wschodnim.

W świetle uzyskanych przez autora wyników, można stwierdzić, że wody wysoko zmineralizowane płyną spod Karpat w kierunku północnym, natomiast wody słodkie, infiltracyjne płyną z północy w kierunku południowym. Kierunki przepływu wód na wychodniach miocenu (w części północnej) są dośrodkowe, a w części południowej (centralnej) odśrodkowe.

Mapa wartości bezwzględnych równych prędkości filtracji wód złożowych w utworach miocenu autochtonicznego zapadliska przedkarpackiego przedstawiona jest na rysunku 8. Wartości prędkości przepływu wód złożowych w utworach miocenu zmieniają się w przedziale od 0,25 do 8 cm/rok. Złoża węglowodorów występują w strefach o podwyższonych lokalnie wartościach prędkości filtracji, tj. powyżej 1 cm/rok.

Na rysunku 9 na tle przekroju geologicznego przedstawiono rozkład naporów hydraulicznych oraz kierunki przepływu wód głębszych w utworach miocenu autochtonicznego. Wartości naporów hydraulicznych w utworach miocenu zmieniają się od 150 do 350 m słupa wody słodkiej nad poziom morza.



Rys. 9. Przekrój hydrogeologiczny przez zapadlisko przedkarpackie: R – jednostka stebnicka, Ms – sarmat, Mb – baden, Cr – kreda, J – jura, T – trias, C – karbon, D – dewon, S – sylur, O – ordowik, Cm – kambr, Pr – prekamb, 1 – powierzchnia potencjometryczna wód złożowych w utworach miocenu, 2 – kierunki przepływu wód podziemnych w utworach miocenu

Sumując wyniki rozważań hydrodynamicznych w utworach miocenu zapadliska przedkarpackiego, można stwierdzić, że:

- wody złożowe w miocenijskim kompleksie mają mineralizację w granicach od 30 do około 60 g/dm³, przy czym obserwuje się spadek mineralizacji w kierunku północnym, tj. w kierunku wschodni utworów miocenijskich (rys. 6);
- kierunki przepływu wód w miocenie, w części północnej zapadliska przedkarpackiego są dośrodkowe, natomiast w części południowej są odśrodkowe (rys. 7–9);
- ciśnienia złożowe są ciśnieniami hydrostatycznymi lub nieco wyższymi od hydrostatycznych;
- gradienty hydrauliczne są podwyższone i wynoszą od 0,005 do 0,050;
- prędkości przepływu wód głębszych są dość duże i wynoszą od 0,25 do kilku cm/rok (rys. 8);
- licznym akumulacjom złożowym towarzyszą wody o podwyższonej mineralizacji, skały zbiornikowe o podwyższonej przepuszczalności i podwyższonej prędkości filtracji.

Miocenijski basen sedymentacyjny jest w trakcie początkowej fazy inwazji wód infiltracyjnych. Na tle przedstawionej klasyfikacji basenów sedymentacyjnych basen zapadliska przedkarpackiego jest basenem przejściowym pomiędzy basenem odśrodkowym a dośrodkowym i należy do basenów perspektywicznych pod względem występowania złóż węglowodorów. Potencjalne pałanki złożowe powinny być związane ze strefami o podwyższonej mineralizacji wód głębszych, podwyższonej przepuszczalności oraz podwyższonej prędkości filtracji. Prawidłowości te potwierdzają liczne odkryte do tej pory w zapadlisku przedkarpackim złoża gazu.

LITERATURA

- [1] Coustau H. i inni: *Classification hydrodynamique des bassins sedimentaires utilisations combinee avec d'autres methodes pour rationaliser l'exploration dans des bassins non-productifs*. IX World Petroleum Congress, Tokio, Japan, 1975
- [2] Dahlberg E.C.: *Applied hydrodynamics in petroleum exploration. Second Edition*. New York, Berlin, London, Springer-Verlag 1995
- [3] Karnkowski P.: *Złoża gazu ziemnego i ropy naftowej w Polsce*. Kraków, Wyd. Towarzystwo Geosynoptyków „GEOS” AGH 1993
- [4] Zawisza L.: *Hydrodynamic condition of hydrocarbon accumulation exemplified by the Carboniferous formation in the Lublin Synclinorium, Poland*. SPE Formation Evaluation, vol. 1, No. 3, 1986
- [5] Zawisza L.: *Hydrodynamic Modelling of the Hydrocarbon Migration and Accumulation in the Lublin Basin*. Paper SPE 100296. SPE Europec/EAGE Annual Conference and Exhibition, Vienna, Austria, 12–15 June 2006