

Wacława Piesik-Buś

Institut Nafty i Gazu, Oddział Krosno

Analiza warunków hydrodynamicznych dla akumulacji węglowodorów w utworach czerwonego spągowca na złożach gazowych monokliny przedsudeckiej

Dla lepszego przybliżenia warunków migracji oraz akumulacji węglowodorów istotnym zagadnieniem jest określenie wielkości i kierunków przepływu wód wglębnych w wyróżnionych kompleksach skał zbiornikowych.

Rozmieszczenie regionalne oraz lokalne złóż ropy i gazu, ulegające ciągłym zmianom w czasie, determinowane jest warunkami równowagi występującymi w poziomach zbiornikowych po każdej przebudowie strukturalnej basenu. Wobec tego położenie akumulacji węglowodorów wyznaczają warunki równowagi zachodzące pomiędzy statyczną fazą skały zbiornikowej a dynamiczną fazą płynów złożowych, istniejące we współczesnym układzie przestrzennym basenu naftowego bez względu na to, gdzie znajdowały się węglowodory w poszczególnych etapach rozwoju tego basenu [4, 5, 6]. Doskonałym narzędziem do oceny potencjału zasobowego oraz perspektyw poszukiwawczych basenów naftowych jest zatem analiza hydrodynamiczna. Analizę taką zastosowano dla oceny basenu permskiego monokliny przedsudeckiej.

Monoklina przedsudecka jest megastrukturą zbudowaną z kilku kompleksów strukturalnych: kaledońskiego, waryscyjskiego, laramijskiego oraz pokrywy polaramijskiej. Z punktu widzenia rozpoznania warunków akumulacji, interesujące są dwa kompleksy: waryscyjski oraz laramijski. Kompleks waryscyjski – stanowiący podłoże dla utworów permu, zbudowany jest w swej najwyższej części z fliszowych utworów dolnokarbońskich, wykazujących wysoki stopień zaangażowania tektonicznego. W zasięgu monokliny, w rejonie jej południowej części zaznacza się występowanie kilku elementów strukturalno-erozyjnych [9]:

- bloku przedsudeckiego,
- zapadliska zielonogórskiego, wypełnionego osadami saksonu,
- wału wolsztyńskiego, o długości około 200 km i szerokości 30÷50 km, w większości pozbawionego osadów saksonu,
- zapadliska poznańskiego, wypełnionego klastycznymi osadami saksonu.

Elementy te miały istotny wpływ na warunki tworzenia osadów permskich (szczególnie czerwonego spągowca), których sedymentacja rozpoczęła się w największych obniżeniach i stopniowo przechodziła na obszary położone wyżej. Osady czerwonego spągowca (saksonu) pokryte są serią utworów anhydrytowo-solnych cechsztynu, a następnie triasu i jury oraz kredy. Najmłodszą pokrywą na całym obszarze tworzą utwory trzecio- i czwartorzędu reprezentujące kompleks polaramijski.

Układ przestrzenny utworów czerwonego spągowca jest złożony. Wpłynęły na to takie czynniki jak: ukształtowanie podpermskiej powierzchni morfologicznej, facjalno-litologiczne warunki powstania osadów oraz ruchy górotwórcze – głównie fazy saalskiej. W strefach okalających obszary alimentacyjne (wyniesienie wolsztyńskie) powstawały fluwialne utwory autunu. Utwory te wykazują duże zróżnicowanie miąższości, związane z sedymentogenezą na zróżnicowanym morfologicznie obszarze podłoża.

Idąc od stropu, profil utworów czerwonego spągowca reprezentowany jest przez szare, drobnoziarniste piaskowce, w różnym stopniu zwięzłe, oraz niżej leżące czerwono-rdzawe piaskowce drobno- i średnioziarniste.

Dolnopermski basen epiwarwaryjskiej depresji przed-sudeckiej, utworzony w końcowym etapie rozwoju cyklu orogenicznego, podporządkowany był postorogenicznym warunkom tektonicznym, determinującym paleogeologiczne czynniki formowania basenu sedymentacyjnego. Produktem tej postorogenicznej sedymentacji jest terygeniczna formacja osadowo-wulkaniczna czerwonego spągowca. Utwory czerwonego spągowca zalegają niezgodnie na sfałdowanym oraz zerodowanym podłożu karbońskim i starszym. Utwory te, o bardzo zmiennej miąższości, składają się z serii piaskowcowo-zlepieńcowo-mułowcowych o zabarwieniu ceglasto-czerwonym, z niewielkim udziałem utworów szarych. Powstały one w warunkach lądowych jako wynik działalności sedymentacji rzecznej, sedymentacji w zbiornikach wód śródlądowych oraz działalności eolicznej.

W cechsztyńskim wapieniu podstawowym, w spągowej partii występuje przeważnie seria łupków miedzionośnych. Miąższość ich nie jest duża i waha się w granicach 0,1÷2,0 m. Utwory wapienia podstawowego na obszarze niecki zielonogórskiej występują w trzech zasadniczych facjach [11]:

- I facja – węglanowo-terygeniczna,
- II facja – dolomitów i wapieni masywnych,
- III facja – węglanowo-mułowcowa.

Utwory wapienia podstawowego charakteryzują się wykształceniem węglanowym w postaci wapieni i dolomitów beżowych oraz szarobeżowych, twardych, spękanych, sporadycznie silnie porowatych, onkolitowych, z wtrąceniami i przerostami anhydrytu. Od góry osady wapienia podstawowego ekranują wyższe poziomy cyklotemu Werra, wykształcone w postaci anhydrytów i soli. Charakter strukturalny poziomu wapienia podstawowego można uważać za zbliżony do obserwowanego w poziomie czerwonego spągowca.

Na obszarze niecki zielonogórskiej zaledwie kilka złóż posiada miąższość poniżej 20 m; przeważnie jest to 30÷70 m, a w nielicznych przypadkach 100÷133 m. To bardzo ważny parametr z uwagi na warunki eksploatacyjne. Jedną z głównych cech charakteryzujących złoża jest ich wielkość – zarówno pod względem powierzchni, jak i zasobności. Małych złóż jest tu niewiele, w większości są one średnie, o powierzchni 5÷15 km²; złoża duże posiadają powierzchnię 20÷40 km² [3].

W złożach niecki zielonogórskiej występuje gaz ziemny zaazotowany. Warunki energetyczne tych złóż zostały określone jako ekspansyjne.

Złoża na obszarze niecki zielonogórskiej występują w trzech rodzajach utworów skalnych [3]:

- w czerwonym spągowcu (np. złożo Wilków),
- w czerwonym spągowcu i wapieniu podstawowym (np. złożo Wierzchowice),
- w wapieniu podstawowym (np. złożo Czeszów).

Zasadnicza, wtórna migracja węglowodorów nastąpiła z początkiem trzeciorzędu, gdy basen permski, po okresie największego pograżenia, w wyniku ruchów laramijskich zaczął wykonywać ruch ku górze. Węglowodory przemieszczały się wewnątrz głębszych części basenu ku strefom płytszym oraz we wszystkich kierunkach ku jego brzegom. Wtedy też nastąpiło wypełnienie pułapek strukturalnych gazem ziemnym. Wskutek młodszych ruchów orogenezy alpejskiej następowało dalsze przemieszczanie się węglowodorów, a przejawy wulkanizmu mogły sprzyjać migracji gazów nieorganicznych (azotu).

Utwory saksonu w niecce poznańskiej wykształcone są jako piaskowce oraz osady piaskowcowo-zlepieńcowate, z podrzędnymi mułowcami i iłowcami. W strefach akumulacji gazu skałami zbiornikowymi są przeważnie piaskowce drobnoziarniste oraz średnioziarniste z domieszką materiału grubszego, przechodzące w piaskowce zlepieńcowate. Spoiwa osadów saksonu są różnorodne: ilasto-żelaziste, węglanowe i krzemionkowe. Rodzaj spoiwa decyduje o porowatości i przepuszczalności – jego duża zmienność w profilu powoduje znaczne zmiany własności zbiornikowych skał.

Analizując własności zbiornikowe utworów saksonu w omawianym rejonie można stwierdzić, że brzeżne strefy basenu sedymentacyjnego posiadają osady typu zlepieńcowatego, z dużą ilością spoiwa o złych własnościach zbiornikowych. Występują one w podniesionej S części skłonu wału wolsztyńskiego. Akumulacja gazu we wszystkich złożach występuje w przystropowych partiach utworów czerwonego spągowca, które budują lokalne podniesienia strukturalno-erozyjne. Od góry ekranowane są one utworami cechsztynu, a od dołu podścielane na całej powierzchni wodami złożowymi. Są to złoża typu masywowego. Powierzchnie pułapek złożowych są przeważnie małe, mieszczące się w zakresie 0,5÷2,6 km². Niekorzystną cechą jest też mała wysokość tych pułapek – w większości przypadków wynosi ona 4÷20 m. Jedynie kilka złóż posiada miąższość 30÷40 m, a wyjątkiem jest złożo Paproć, o miąższości 140 m.

Występujące w omawianym rejonie złoża układają się wzdłuż pewnych stref, które wiążą się z układem przestrzennym czerwonego spągowca i ukształtowaniem podłoża.

W nawiązaniu do wydzielonych wyniesień, złoża gazu układają się w następujące ciągi:

- Paproć-Ujazd – wiążące się z NE skłonem wyniesienia wolsztyńskiego,
- Sątopy-Bukowiec-Grodzisk – leżące na SW stoku garbu Lwówka-Strykowa,
- Chraplewo-Buk-Szewce-Stęszew – leżące na NE skłonie garbu Lwówka-Strykowa,
- Duszniki-Podrzewie-Ceradz-Jankowice – związane z SW skłonem podniesienia Młodaska-Rokietnicy,
- Klęka-Kaleje-Czmoń – wysunięte najbardziej ku „SE” i prawdopodobnie związane z przedłużeniem garbu Lwówka oraz z dalekim skłonem wyniesienia wolsztyńskiego.

Dla potrzeb modelowania hydrodynamicznego basenów naftowych opracowano metodykę ilościowej oceny warunków migracji i akumulacji węglowodorów [4-10]. Metodyka ta polega na wykonaniu kilkunastu map, które obejmują:

- mapy strukturalne poziomów wodo-ropo-gazonośnych $z(x,y)$,
- mapy izopachytowe poziomów wodo-ropo-gazonośnych $m(x,y)$,
- mapy parametrów zbiornikowych, tj. mapę współczynnika filtracji $K_{ws}(x,y)$ oraz mapę współczynnika przewodności hydraulicznej $T(x,y)$,
- mapy mineralizacji wód złożowych poziomów wodo-ropo-gazonośnych $M(x,y)$,
- mapy potencjometryczne wód złożowych w przeliczeniu na słup wody słodkiej $H_{ws}(x,y)$,
- mapy wartości bezwzględnych równych prędkości filtracji wód złożowych $\bar{v}(x,y)$,
- mapy wartości bezwzględnych równych przepływów jednostkowych wód złożowych $\bar{q}(x,y)$,
- mapy potencjalnych pułapek hydrodynamicznych dla ropy $H_r(x,y)$ i gazu ziemnego $H_g(x,y)$.

Mapa potencjometryczna wód złożowych $H_{ws}(x,y)$ przedstawia rozkład pola hydrodynamicznego. Zagadnienie rozkładu powierzchni potencjometrycznej wód wglębnych sprowadza się do rozwiązania uogólnionego równania Laplace’a, które dla środowiska heterogenicznego o zmiennej mineralizacji wód złożowych oraz dla przepływu stacjonarnego (ustalonego), dwuwymiarowego będzie miało postać [6, 8]:

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

Warunkami brzegowymi dla rozwiązania tego 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/m³],

p – ciśnienie złożowe [Pa],

z – wysokość położenia punktu pomiaru ciśnienia złożowego w stosunku do poziomu morza (lub wysokość położenia stropu poziomu wodo-ropo-gazowego w stosunku do poziomu morza) [m].

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

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

Mapa wartości bezwzględnych równych prędkości filtracji pozwala na określenie kierunków i prędkości przepływu wód złożowych w dowolnym punkcie przestrzeni porowej.

Mapy wartości bezwzględnych równych przepływów jednostkowych wód złożowych $\bar{q}(x,y)$ mogą być skonstruowane w oparciu o równanie [6, 7, 8]:

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

Mapa wartości bezwzględnych równych przepływów jednostkowych wód złożowych pozwala na określenie objętości wody złożowej, w przeliczeniu na wodę słodką, przepływającej w jednostce czasu przez jednostkowy przekrój o szerokości 1 m i wysokości równej całkowitej miąższości analizowanego profilu warstw, w dowolnym punkcie obszaru.

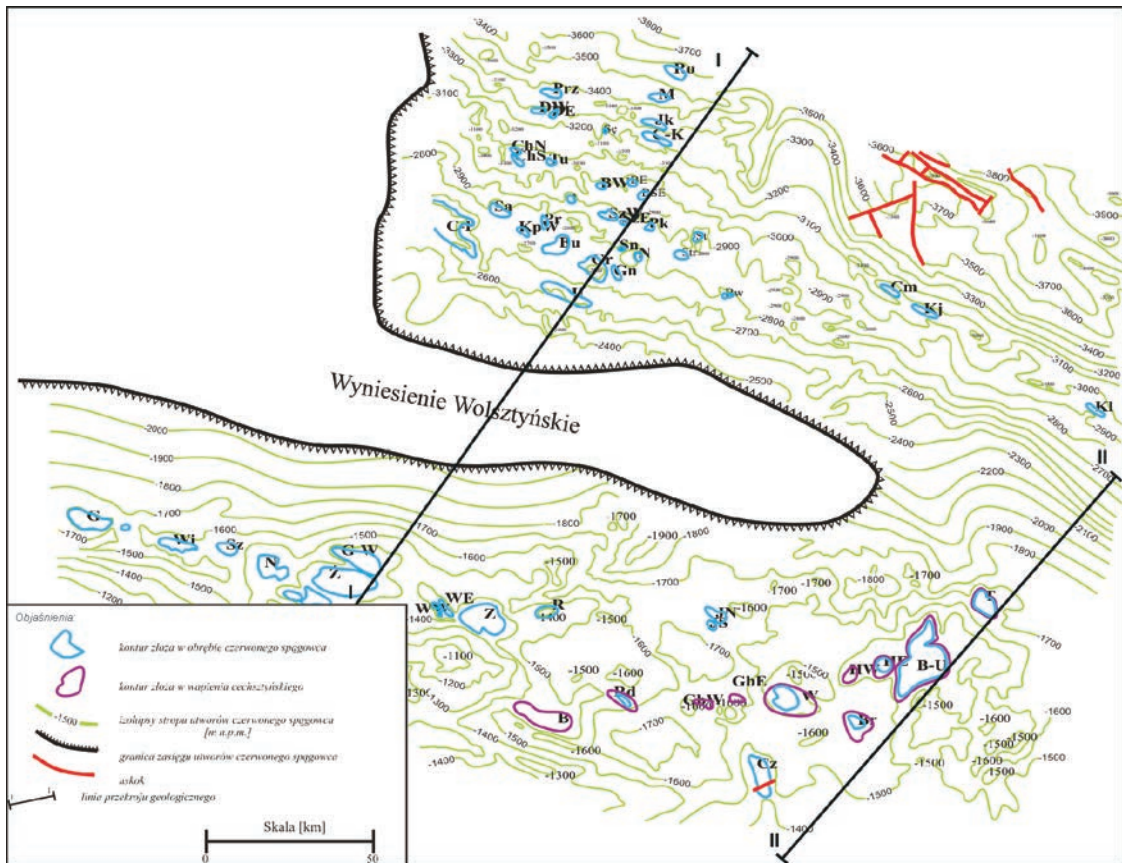
Metodyka konstrukcji map potencjalnych pułapek złożowych dla ropy $H_r(x,y)$ i gazu ziemnego $H_g(x,y)$ sprowadza się do wykonania kilku stosunkowo prostych operacji algebraicznych: dodawania, odejmowania i mnożenia wartości przedstawionych na poszczególnych mapach, zgodnie z równaniami [6, 8, 11]:

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

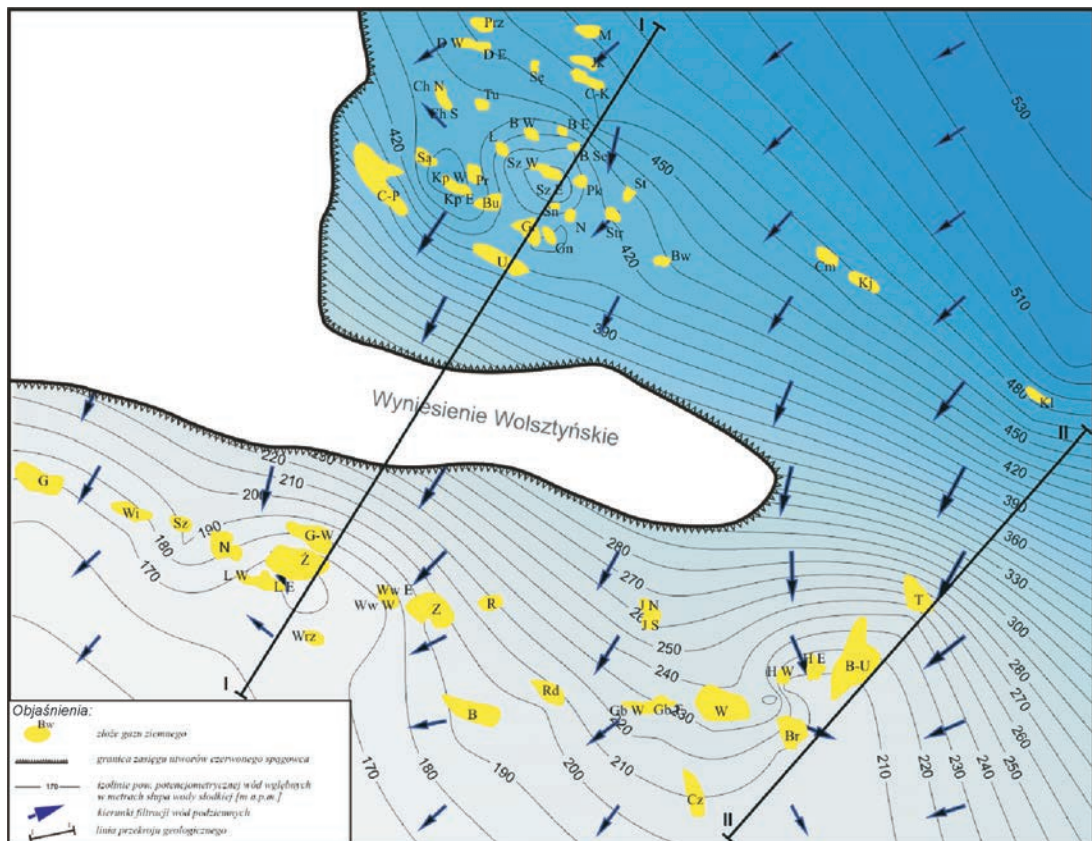
$$H_g(x,y) = H_{ws}(x,y) - z(x,y) \frac{\gamma_w(x,y) - \gamma_g(x,y)}{\gamma_{ws}} \quad (6)$$

Wyrażenia H_{ws} , H_r i H_g oznaczają potencjały dla wody, ropy i gazu, wyrażone w metrach słupa wody słodkiej, określone dla tego samego punktu złoża.

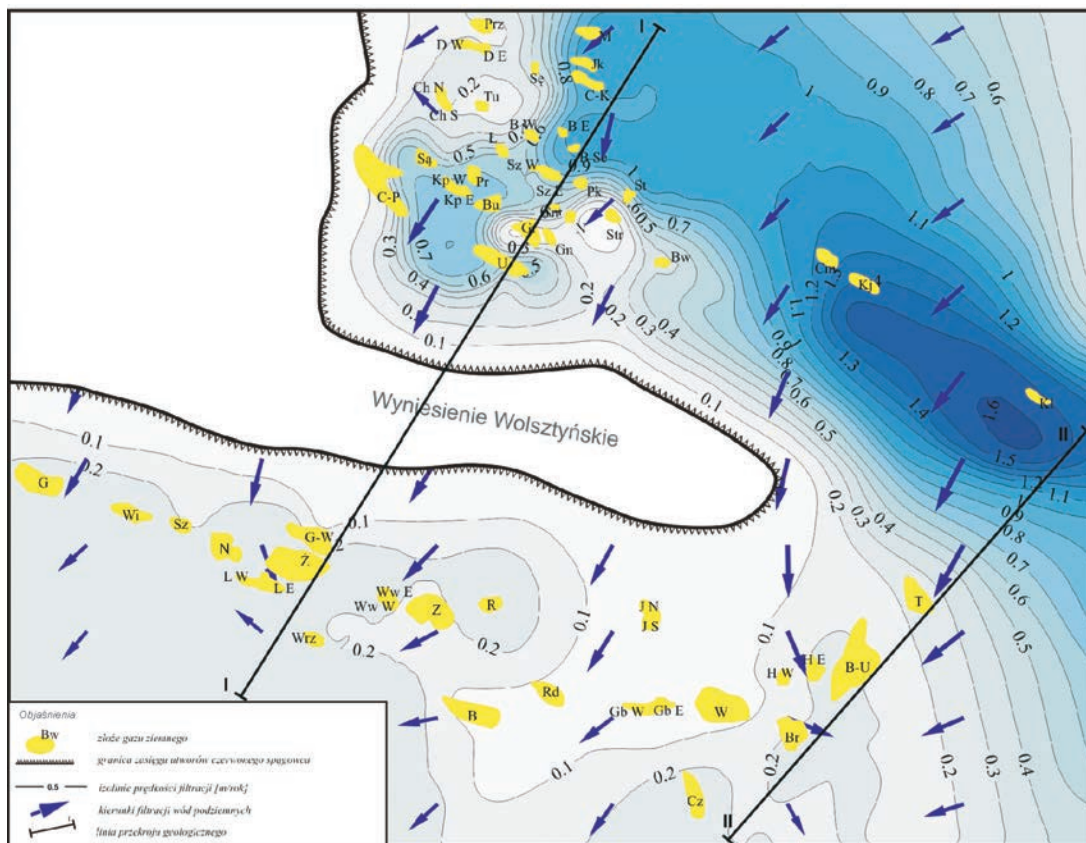
Zaprezentowana metodyka ilościowej oceny warunków migracji i akumulacji węglowodorów została zastosowana do analizy hydrodynamicznej basenu permskiego monokliny przedsudeckiej. Mapę strukturalną stropu utworów czerwonego spągowca (saksonu) przedstawiono na rysunku 1.



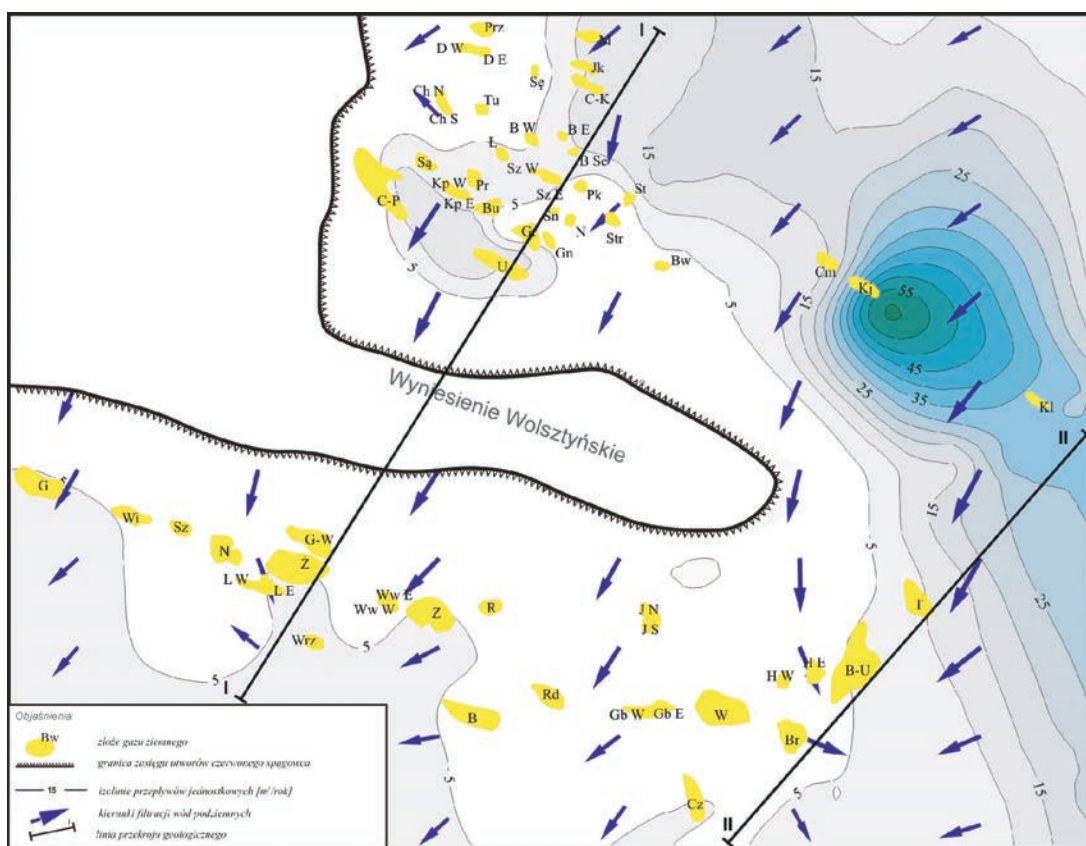
Rys. 1. Mapa strukturalna stropu czerwonego spągowca monokliny przedsudeckiej



Rys. 2. Mapa potencjometryczna wód głębszych w utworach czerwonego spągowca monokliny przedsudeckiej



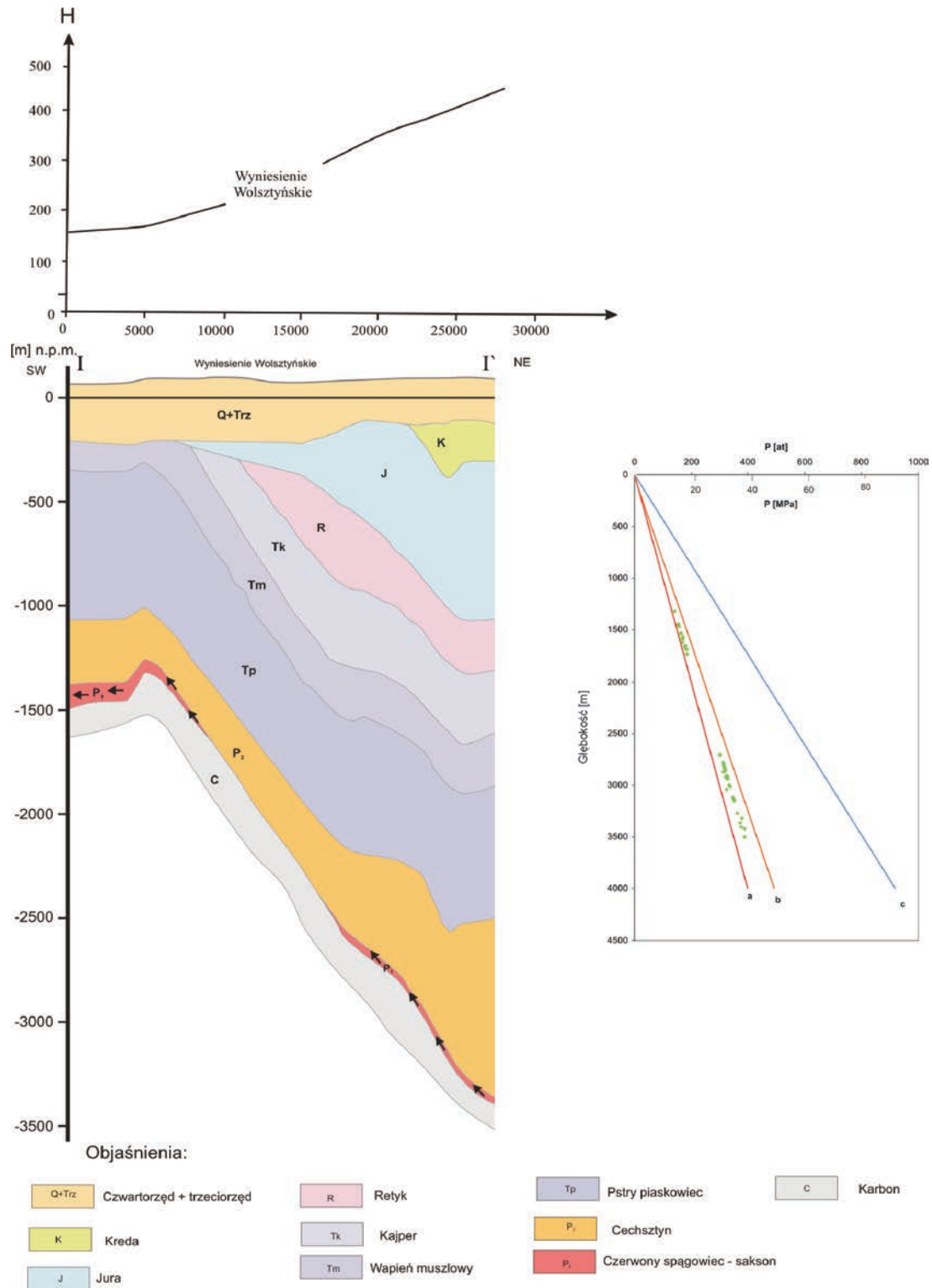
Rys. 3. Mapa wartości bezwzględnych równych prędkości filtracji wód głębinnych w utworach czerwonego spągowca monokliny przedsudeckiej



Rys. 4. Mapa przepływów jednostkowych wód głębinnych w utworach czerwonego spągowca monokliny przedsudeckiej

Mapa potencjometryczna wód złożowych w utworach czerwonego spągowca przedstawia rozkład pola hydrodynamicznego, główne kierunki przepływu, a także położenie obszarów zasilania i drenażu oraz względnego zastoju. Wartości naporów hydraulicznych w utworach czerwonego spągowca są bardzo wysokie i wynoszą od 150 do

530 metrów słupa wody słodkiej n.p.m. Wody podziemne płyną od centralnej części basenu dolnopermskiego w kierunku jego wychodni, tj. z północnego-wschodu na południowy-zachód, napotykając na przeszkodę w postaci wyniesienia wolsztyńskiego, stanowiącego na drodze ich przepływu barierę hydrauliczną i mającego istotny wpływ



Rys. 5. Przekrój hydrogeologiczny I-I' przez monoklinę przedsudecką

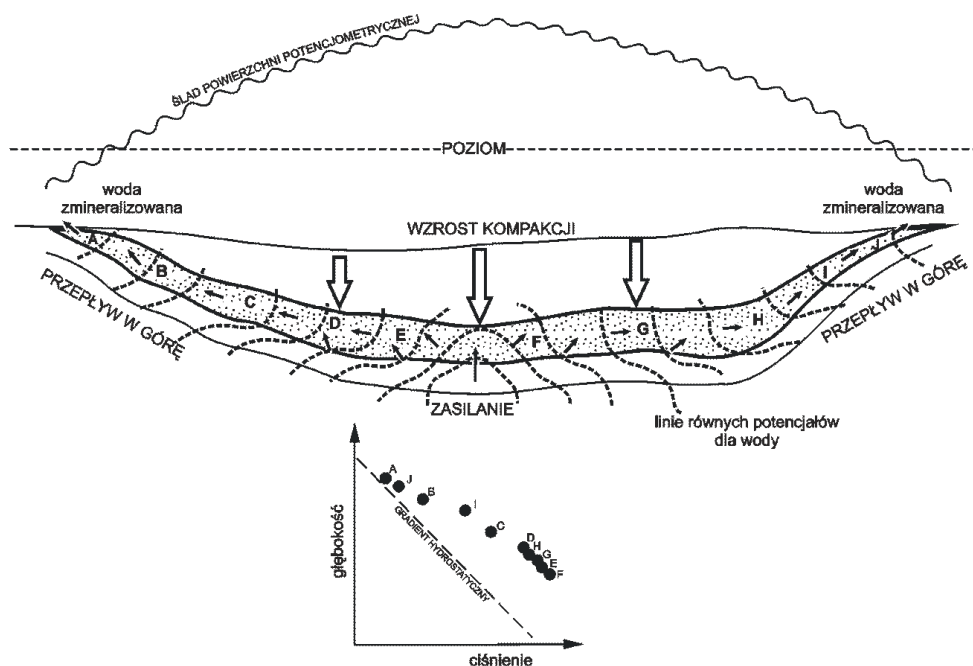
na rozmieszczenie złóż węglowodorów w utworach czerwonego spągowca.

Z mapy równych prędkości filtracji dla wody złożowej wynika, że prędkości filtracji wód podziemnych są stosunkowo wysokie i wynoszą od kilku do 190 cm/rok. Liczne akumulacje złożowe występują w strefach o obniżonej prędkości filtracji – poniżej 100 cm/rok. Zmniejszenie prędkości filtracji następuje w rejonie wyniesienia wolsztyńskiego (po obydwu jego stronach), stanowiącego niejako zaporę dla przepływających wód głębszych.

Z mapy przepływów jednostkowych wód głębszych

w utworach czerwonego spągowca wynika, że wielkości przepływów jednostkowych wahają się w przedziale $1,0 \div 60,0 \text{ m}^2/\text{rok}$. Złoża węglowodorów występują w strefach o obniżonych wartościach przepływów, tj. poniżej $12 \text{ m}^2/\text{rok}$.

Na tle przekroju hydrogeologicznego I-I' przedstawiono rozkład naporów hydraulicznych oraz kierunki przepływu wód głębszych w utworach czerwonego spągowca. Z danych przedstawionych na rysunku 5 wynika, że ciśnienia złożowe są równe ciśnieniom hydrostatycznym lub są od nich wyższe oraz że przepływy wód głębszych są odśrodkowe.



Rys. 6. Basen młody

Podsumowanie i wnioski

Podsumowując wyniki rozważań hydrodynamicznych przeprowadzonych dla basenu permskiego monokliny przedsudeckiej można stwierdzić, że:

- ciśnienia złożowe są równe ciśnieniom hydrostatycznym lub są od nich wyższe,
- kierunki przepływu wód głębszych są odśrodkowe,
- prędkości przepływu wód głębszych są stosunkowo wysokie i wynoszą od 0,05 do 1,90 m/rok,
- wielkości przepływów jednostkowych wód głębszych w utworach czerwonego spągowca są również wysokie i wynoszą od 1,0 do 60,0 m^2/rok ,
- licznym akumulacjom złożowym towarzyszą wody o lokalnie obniżonych prędkościach przepływu wód głębszych i lokalnie obniżonych wartościach przepływów jednostkowych tych wód.

Na tle omówionej hydrodynamicznej klasyfikacji basenów naftowych [1, 2, 5-10] można stwierdzić, że dolnopermski basen monokliny przedsudeckiej jest basenem odśrodkowym (młodym) i należy do basenów o wysokiej perspektywiczności dla występowania węglowodorów.

Potencjalne pułapki złożowe w utworach czerwonego spągowca związane są ze strefami o podwyższonej mineralizacji wód głębszych oraz obniżonej prędkości filtracji i wymiany tych wód. Zasadniczy wpływ na rozmieszczenie złóż węglowodorów ma wyniesienie wolsztyńskie. Złoża węglowodorów występują w strefach stagnacji wód złożowych, tj.: przed wyniesieniem wolsztyńskim – w niecce poznańskiej, oraz za nim – w niecce zielonogórskiej.

Artykuł nadesłano do Redakcji 6.09.2011 r. Przyjęto do druku 8.11.2011 r.

Recenzent: prof. zw. dr hab. inż. Andrzej Kostecki

Literatura

- [1] Coustau H. i in.: *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, 1975.
- [2] Dahlberg E.C.: *Applied hydrodynamics in petroleum exploration*. Second Edition. New York, Berlin, Heidelberg, London, Paris, Tokyo, Hong Kong, Barcelona, Budapest, Springer – Verlag, 1995.
- [3] Dokumentacje geologiczne INiG Krosno.
- [4] Hubbert M.K.: *Entrapment of petroleum under hydrodynamic conditions*. Am. Assoc. Pet. Geol. Bull., vol. 37, no. 8, 1954-2026, 1953.
- [5] Jucha S., Weiner R., Zawisza L.: *Polish method of digital mapping of potential hydrodynamic traps for oil and gas deposits exploration*. Sci. de la Terre, Sér. Inf., Nancy, vol. 27, 1988.
- [6] Zawisza L.: *Hydrodynamic condition of hydrocarbon accumulation exemplified by the Carboniferous formation in the Lublin Synclinorium, Poland*. Society of Petroleum Engineers Formation Evaluation, vol. 1, no. 3, 286-294, 1986.
- [7] Zawisza L.: *Hydrodynamic condition of hydrocarbon accumulation exemplified by the Pomorsko and Czerwiesk oil fields in the Polish Lowland*. SPE Paper 90586, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, USA, 26-29 September 2004.
- [8] Zawisza L.: *Hydrodynamic conditions of hydrocarbon accumulation exemplified by the Carboniferous Formation in the Lublin Synclinorium, Poland*. AAPG Treatise of Petroleum Geology Reprint Series No. 6, Traps and Seals I, USA, 1988, s. 10.
- [9] Zawisza L.: *Hydrodynamiczne modelowanie basenów naftowych dla oceny ich perspektyw złożowych*. Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, Kraków. Studia, Rozprawy, Monografie 140. Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków, 2007.
- [10] Zawisza L.: *Methodics of mapping hydrodynamic petroleum traps in sedimentary basins with groundwater of variable density*. Archiwum Górnictwa, t. 31, z. 1. Kraków, 1986.
- [11] Zawisza L.: *Warunki hydrodynamiczne dla akumulacji węglowodorów w karbonie i dewonie synklinorium lubelskiego*. Wrocław, Warszawa, Kraków, Gdańsk, Łódź, Prace Geologiczne Komisji Nauk Geologicznych PAN, nr 134, Wydawnictwo Polskiej Akademii Nauk, 1988.



Mgr inż. Wacława PIESIK-BUŚ – absolwentka Wydziału Geologii Poszukiwawczej AGH w Krakowie. Specjalizuje się w zagadnieniach geologii naftowej (praca magisterska na temat genezy anomalnych ciśnień złożowych i porowych w wytypowanych strefach Karpat fliszowych). Od 1987 r. pracownik Zakładu Podziemnego Magazynewania Gazu w INiG. Autorka wielu publikacji.

ZAKŁAD PODZIEMNEGO MAGAZYNOWANIA GAZU

- analiza struktur geologicznych złóż gazu ziemnego, ropy naftowej oraz obiektów zawodnionych, pod kątem możliwości ich przekształcenia w PMG;
- szczegółowa analiza warunków geologiczno-złożowych, ocena dotychczasowej eksploatacji złoża, warunków hydrodynamicznych, zdolności wydobywczych odwiertów;
- ocena stanu technicznego istniejącej infrastruktury w aspekcie jej wykorzystania w pracy PMG;
- wykonywanie cyfrowych modeli geologicznych PMG, złóż gazu ziemnego i ropy naftowej;
- wykonanie projektu budowy PMG;
- analiza dotychczasowej pracy istniejących PMG w celu optymalizacji parametrów dalszej eksploatacji magazynów na bazie symulacji komputerowej;
- opracowanie projektów prac geologicznych, dotyczących poszukiwania i rozpoznawania złóż gazu ziemnego i ropy naftowej;
- opracowanie dokumentacji geologicznych złóż ropy naftowej i gazu ziemnego;
- opracowanie programu optymalnej eksploatacji złoża, wydajności poszczególnych odwiertów, tempa szczypania itp.

Kierownik: mgr inż. Bogdan Filar

Adres: ul. Armii Krajowej 3, 38-400 Krosno

Telefon: 13 436-89-41 w. 202

Faks: 13 436-79-71

E-mail: bogdan.filar@inig.pl

