

Typy pułapek gazu ziemnego i strefowość występowania ich złóż w osadach miocenu wschodniej części zapadliska przedkarpackiego

Michał Myśliwiec*

Traps for gas accumulations and the resulting zonation of the gas fields in the Miocene strata of the eastern part of the Carpathian Foredeep (SE Poland). *Prz. Geol.*, 52: 657–664.

S u m m a r y. The intention of this paper is to present the description of the traps for gas accumulations in the Miocene deposits of the Carpathian Foredeep and the resulting zonation of the gas fields. The traps are related first of all to the palaeomorphology of the pre-Miocene basement formed by erosion supported by faulting processes. This type of traps is classified as compactional traps. The second kind of very productive structural traps was recognised beneath the Carpathian sole thrust, at the front of the Carpathians. The fault related trapping mechanism is also known from several gas fields. The pinching-out trap types caused by the horizontal and the vertical facies changes are rare and occur most often in the topmost part of the Miocene succession, because of the more favourable facies and less compactional deformation of the strata. According to the geological features and the types of the traps and sealing mechanisms, five gas field's zones were recognized in the eastern part of the Carpathian Foredeep.

Key words: hydrocarbon traps, Miocene, Carpathian Foredeep, gas fields

Zapadlisko przedkarpackie to peryferyjny, molasowy basen sedymentacyjny, powstały na przedpolu nasuwających się ku północy Karpat. Podłożem zapadliska są skały platformy epiwarwaryjskiej. Z punktu widzenia poszukiwań naftowych największe znaczenie ma pokrywa utworów miocenijskich powstałych w najbardziej północnej części basenu postorogenicznego. Można w nim wyróżnić część zewnętrzną i wewnętrzną (Ney, 1968). Obie wypełnione są utworami miocenu, przy czym część z nich spoczywa w położeniu nienaruszonym (utwory autochtoniczne), a część została odkorzeniona, sfałdowana wraz z fałdami karpackimi i nasunięta w kierunku północnym na utwory autochtoniczne (utwory alochtoniczne: jednostki stebnicka i zgłobicka). Utwory dolno- i środkowomiocenijskie wypełniające zapadlisko wewnętrzne osiągają miąższości do 1500 m (Oszczypko, 1996). Osady alochtoniczne, jako skały zbiornikowe nie mają większego znaczenia dla poszukiwań węglowodorów. Najważniejszą serią produktywną są wypełniające zapadlisko zewnętrzne utwory autochtoniczne o miąższości sięgającej aż 3500 m, w tzw. rowie Wielkich Oczu.

W utworach miocenu wschodniej części zapadliska przedkarpackiego odkryto już kilkadziesiąt złóż gazu ziemnego (ryc. 1). Wobec powszechności generowania gazu mikrobialnego w ilastych osadach miocenu (Kotarba, 1999) oraz powszechnego występowania skał zbiornikowych, istnienie tych akumulacji jest uwarunkowane głównie sposobem i kierunkami migracji gazu oraz regułami powstawania pułapek. Chociaż każde z dotychczas odkrytych złóż ma wiele cech indywidualnych, to w przypadku większości jest możliwe określenie pewnych cech wspólnych, m.in. typu pułapki złożowej oraz sposobu jej uszczelnienia. Rozpoznanie tych cech ma zasadnicze znaczenie dla powodzenia poszukiwania złóż węglowodorów.

Odtworzenie obrazu geometrycznego pułapki jest możliwe na podstawie badań sejsmicznych, na podstawie danych uzyskanych z wierceń oraz z późniejszej eksploata-

cji. Często, przy braku dostatecznie czytelnych i licznych danych geologiczno-złożowych, dla określenia typu pułapki konieczne jest szczególnie staranne prześledzenie wszystkich etapów rozwoju geologicznego regionu. W zapadlisku przedkarpackim na częstość występowania i typ pułapek dla gazu decydujący wpływ miały: ukształtowanie pogrzebanego reliefu stropu podłoża podneogeńskiego, kompaktacja osadów miocenu ponad jego wyniesieniami oraz deformujący wpływ nasuwających się Karpat.

Podneogeńska powierzchnia niezgodności (ryc. 2) dla złóż w skałach podłoża pełni rolę regionalnego w skali całego zapadliska uszczelnienia. Dla występowania złóż gazu w miocenie decydujące znaczenie ma jej ukształtowanie, bez wyraźnego związku z wiekiem i litologią skał podłoża. Do jej ukształtowania przyczyniły się zarówno ruchy różnicujące wzdłuż uskoku, jak i intensywna erozja.

Typy pułapek gazu ziemnego

Pułapki strukturalne.

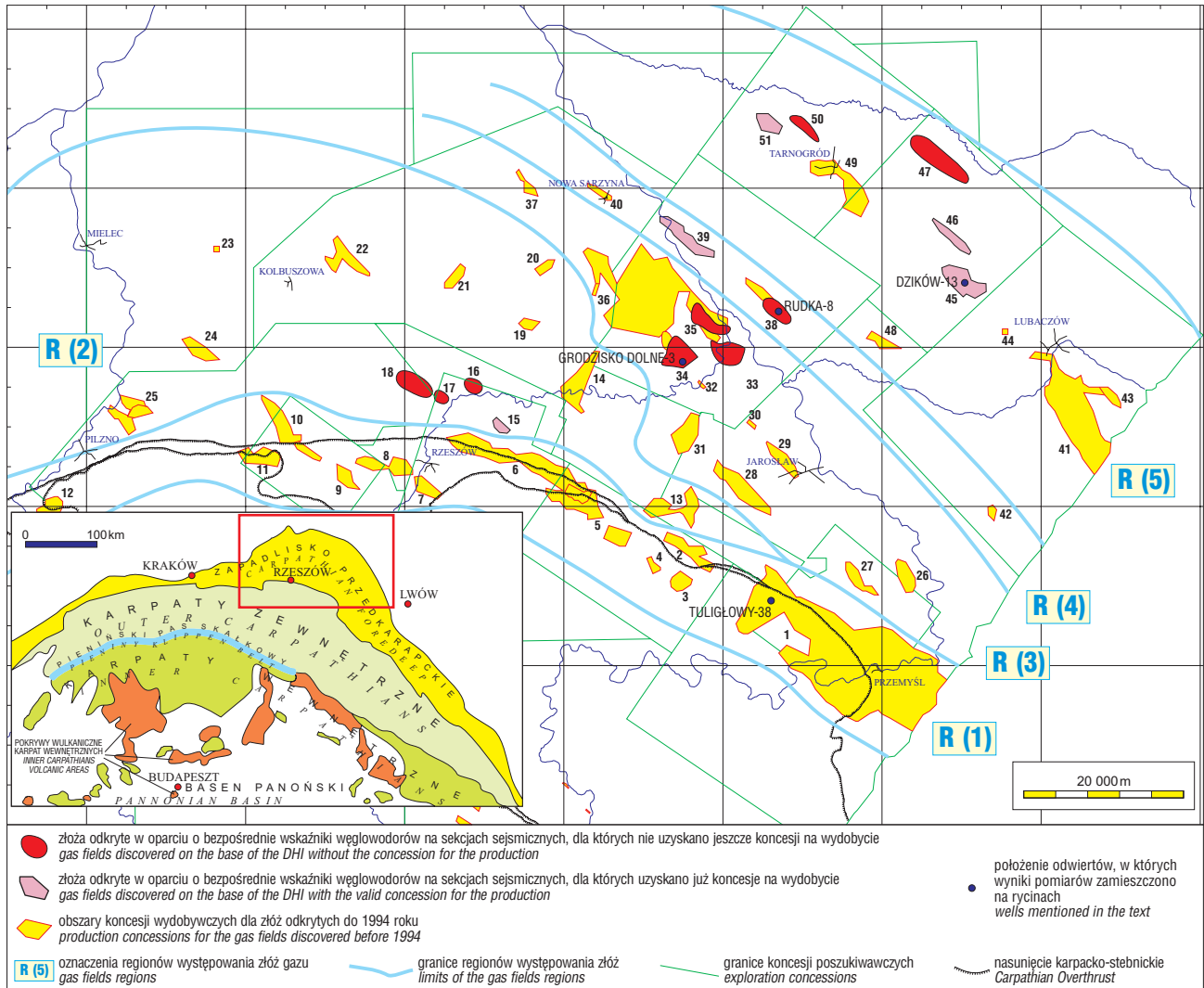
1. Antykliny kompakcyjne są najczęstszym typem pułapek gazu w osadach miocenu zapadliska przedkarpackiego (ryc. 3). Powstawały ponad wyniesieniami prekambryjskiego, paleozoicznego lub mezozoicznego podłoża, w trakcie kompaktacji skał piaszczysto-ilastych. Skałami uszczelniającymi dla złóż w antyklinach kompakcyjnych są nieprzepuszczalne łupki ilaste. Wielokrotnie stwierdzano, że miąższość warstw uszczelniających nie jest decydującym parametrem i że już bardzo niewielkiej, nawet kilkudziesięciocentymetrowej miąższości warstwa ilasta jest wystarczająca dla dobrego uszczelnienia nagromadzeń gazu.

Wielohoryzontowe złoża gazu ziemnego w antyklinach kompakcyjnych charakteryzują się różnymi relacjami gaz-woda podścielająca lub okalająca, w zależności od typu facjalnego oraz litologii skał zbiornikowych. Jeżeli akumulacje gazu znajdują się w antyklinach kompakcyjnych, złożonych z wyraźnie izolowanych dostatecznie miąższych piaszczystych warstw, np. deltowych progredujących nasypów akumulacyjnych uszczelnionych przez ilaste osady dna basenu lub piaszczystych wypełnień

*PGNiG S.A. Departament Poszukiwania Złóż, Ośrodek Południe w Jasle, ul. Asnyka 6, 38-200 Jasło; m.mysliwiec@geonaf.ta.jaslo.pl

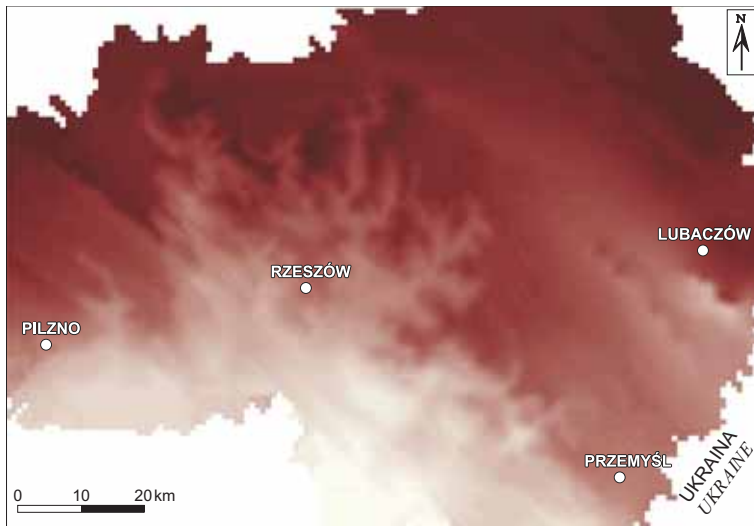
kanałów górnego stożka podmorskiego, w przypadku każdego z horyzontów jest możliwa identyfikacja czytelnego kontaktu gaz/woda. Ze względu na małe miąższości horyzontów rzadziej jest to woda podścielająca, częściej okalająca. Dobrymi przykładami takich akumulacji są położone w osadach deltowych horyzonty złoże Palikówka, Jasionka i Chałupki Dębniańskie, czy też występujące

w osadach stożków podmorskich horyzonty złoże Jodłówka i niższe horyzonty złoże Żołyńia „E”. Inaczej jest w przypadku, jeśli gaz jest zakumulowany w antyklinalach kompakcyjnych złożonych z heterolitów dna basenu, cienkowarstwowych turbidytów zewnętrznego stożka podmorskiego lub dystalnych deltowych turbidytów. W takich przypadkach każda z cienkich warstw piaszczystych



Ryc. 1. Strefy występowania ziół we wschodniej części zapadliska przedkarpacciego. Strefa nasunięcia karpacko-stebnickiego: 1 — Pole gazu ziemnego Przemyśl (złoże Przemyśl, Jaksmanice, Maćkowice, Wapowce, Tuligłowy), 2 — Pruchnik, 3 — Jodłówka, 4 — Rączyna, 5 — Husów, 6 — Albigowa-Krasne, 7 — Zalesie, 8 — Kielanówka, 9 — Nosówka, 10 — Czarna Sędziszowska, 11 — Sędziszów, 12 — Pilzno. Strefa Kańczuga-Rzeszów: 13 — Kańczuga, 14 — Smolarzyny, 15 — Palikówka, 16 — Terliczka, 17 — Stobierna, 18 — Jasionka, 19 — Kąty Rakszawskie, 20 — Wola Zarczycka, 21 — Sokołów, 22 — Lipnica-Dzikowiec, 23 — Niwiska, 24 — Blizna-Ocieka, 25 — Brzeźnica. Strefa centralna: 26 — Święte-Zadąbrowie, 27 — Gubernia, 28 — Mirocin, 29 — Jarosław, 30 — Ujezyna, 31 — Przeworsk, 32 — Tryńcza, 33 — Chałupki Dębniańskie, 34 — Grodzisko Dolne, 35 — Żołyńia E, 36 — Żołyńia-Leżajsk, 37 — Jeżowe. Strefa zrębu Ryszkowej Woli: 38 — Rudka, 39 — Kuryłówka, 40 — Sarzyna. Strefa północna: 41 — Lubaczów, 42 — Chotyniec, 43 — Cetynia, 44 — Uszkowce, 45 — Dzików, 46 — Wola Obszańska, 47 — Łukowa, 48 — Mołodycz, 49 — Tarnogród, 50 — Księżpól, 51 — Biszczka

Fig. 1. The zonation of the gas fields in the Miocene deposits of the Carpathian Foredeep. The Carpathian Overthrust Zone: 1 — Przemyśl Gas Fields Group (Przemyśl, Jaksmanice, Maćkowice, Wapowce, Tuligłowy gas fields), 2 — Pruchnik, 3 — Jodłówka, 4 — Rączyna, 5 — Husów, 6 — Albigowa-Krasne, 7 — Zalesie, 8 — Kielanówka, 9 — Nosówka, 10 — Czarna Sędziszowska, 11 — Sędziszów, 12 — Pilzno. Kańczuga-Rzeszów Zone: 13 — Kańczuga, 14 — Smolarzyny, 15 — Palikówka, 16 — Terliczka, 17 — Stobierna, 18 — Jasionka, 19 — Kąty Rakszawskie, 20 — Wola Zarczycka, 21 — Sokołów, 22 — Lipnica-Dzikowiec, 23 — Niwiska, 24 — Blizna-Ocieka, 25 — Brzeźnica. Central Zone: 26 — Święte-Zadąbrowie, 27 — Gubernia, 28 — Mirocin, 29 — Jarosław, 30 — Ujezyna, 31 — Przeworsk, 32 — Tryńcza, 33 — Chałupki Dębniańskie, 34 — Grodzisko Dolne, 35 — Żołyńia E, 36 — Żołyńia-Leżajsk, 37 — Jeżowe. Ryszkowa Wola Horst Zone: 38 — Rudka, 39 — Kuryłówka, 40 — Sarzyna. Northern Zone: 41 — Lubaczów, 42 — Chotyniec, 43 — Cetynia, 44 — Uszkowce, 45 — Dzików, 46 — Wola Obszańska, 47 — Łukowa, 48 — Mołodycz, 49 — Tarnogród, 50 — Księżpól, 51 — Biszczka

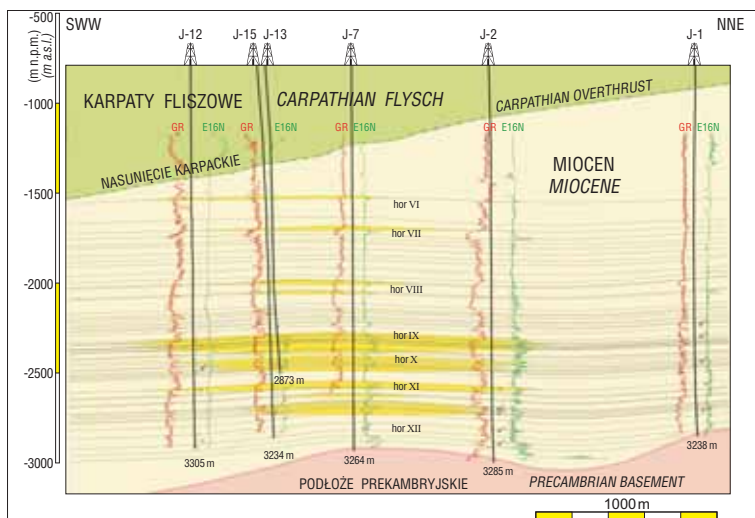


Ryc. 2. Plastikarna mapa przedstawiająca ukształtowanie stropu podłoża osadów miocenu. Zwraca uwagę różnica między rejonem Rzeszowa (dendrytowy układ paleodolin otwartych ku południowi) a spokojniejszą częścią północno-wschodnią

Fig. 2. Map showing the surface relief of the top of the Miocene deposits basement. Note the difference between Rzeszów area (with a dendritic pattern open southward) of the paleo-valleys and the less diversified SE part

lub mułowcowych skał zbiornikowych ma swój własny kontakt gaz/woda. Określenie granic takiego złoża, a co za tym idzie również jego zasobów jest niezwykle trudne i zazwyczaj polega na wyznaczeniu umownego kontaktu pionowego. Dobrym przykładem są I horyzont złoża Żołyńca i położone w obrębie piaskowcowo-mułowcowych turbidytów niższe horyzonty złoża Palikówka.

2. Pułapki strukturalne związane z nasunięciem Karpat fliszowych zawierają znaczące zasoby gazu w takich złożach jak Przemyśl, Tuligłowy, Husów-Albigowa-Krasne, Rączyna, Pilzno i in. (ryc. 4). Wszystkie są położone w strefie wzdłuż nasunięcia karpacko-stebnickiego. Warstwy osadów miocenu zostały tutaj poddarte w wyniku napierania przez nasuwającą się płaszczwinę skolską oraz sfałdowane utwory miocenu (jednostki stebnicka i zgłobicka). Akumulacje gazowe są uszczelnione



Ryc. 3. Przykład pułapki w antyklinie kompacyjnej. Złoże Jodłówka (według S. Gašior, B. Plezia i C. Turek — niepublikowane)

Fig. 3. A compactional anticline of the Jodłówka gas field (acc. S. Gašior, B. Plezia and C. Turek — unpublished)

przez strefę nasunięcia od strony południowej, a od strony północnej ograniczone konturem gaz/woda.

Czynnikiem uszczelniającym jest powierzchnia (strefa) nasunięcia lub nieprzepuszczalne fliszowe skały ilaste.

3. Pułapki strukturalne ekranowane tektonicznie przez powierzchnie uskoków w osadach miocenu są dość słabo rozpoznane w związku z trudnościami poprawnej interpretacji uskoków na podstawie materiałów sejsmicznych. Udokumentowane przykłady takich pułapek są znane ze złóż Mołodycz, Rudka, Ryszkowa Wola, Sarzyna, Rokietnica, Jarosław, Radymno i Dziaków (Myśliwiec, 1998, ryc. 5 i 6).

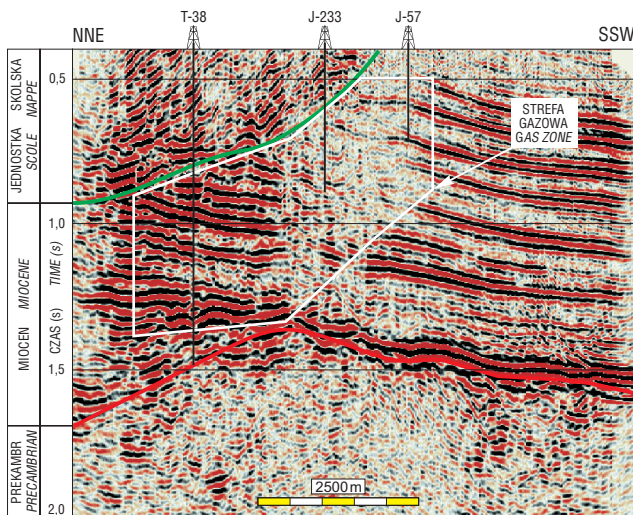
System uskoków z którymi są związane pułapki złożowe to synsedymencyjne podłużne uskoki normalne o kierunku NW–SE oraz poprzeczne uskoki o kierunku NE–SW. System o kierunku NW–SE powstał w związku z ekstensją wywołaną przez ugięcie płyty lito-sferycznej przedpola Karpat i reaktywacją starszych stref nieciągłości (Krzywiec, 1999). Uskoki normalne ograniczone do piaszczysto-ilastych osadów miocenu powstawały

również ponad wyniesieniami w podłożu w wyniku nierównomiernej kompacji. Tworzenie systemu uskoków odwróconych, jak i pozytywnych struktur kwiatowych (np. zrębu Ryszkowej Woli) miało ścisły związek z ruchem nasuwczym Karpat (Krzywiec, 1999). Powstawanie tych ostatnich było wynikiem prawoskrętnego ruchu przesuwczego, spowodowanego ukośnym działaniem kompresji związanej z kolizją karpacką na wcześniej reaktywowane starsze strefy nieciągłości o kierunku NW–SE (Krzywiec, 1999).

Czasami mimo dobrej jakości danych sejsmicznych dyslokacje w osadach miocenu są trudne do interpretacji w zakresie ustalenia zrzutów, co ma duże znaczenie dla geologii złożowej. W przypadkach, kiedy powierzchnia uskoku została przebita otworem wiertniczym możliwe jest ustalenie parametrów uskoku na podstawie interpretacji upadomierza (zrzut uskoku, kąt i kierunek upadu powierzchni uskokowej). Przykłady takich interpretacji są znane dla uskoków poprzecznych o kierunku SW–NE z rejonu Grodziska Dolnego i Dębna (ryc. 7).

Badania zależności rozkładu złóż gazu od położenia stref dyslokacyjnych dowiodły, że strefy te w dużej mierze kontrolują występowanie akumulacji, w szczególności w osadach miocenu (Karnkowski & Ziolkowski, 1998, 2001). Zdaniem Karnkowskiego (1999) uskoki podłużne o kierunku NW–SE mogły pełnić rolę dróg migracji dla gazu, natomiast uskoki poprzeczne rolę pułapkotwórczą. Wyniki ostatnich badań w rejonie Chałupek Dębniańskich i Żołyńca zdają się potwierdzać tą tezę.

4. Jedynym znanym w zapadlisku przykładem pułapki diapirowej jest według Karnkowskiego (1999) złoże Sędziszów, gdzie występuje diapirowa deformacja warstw stebnickich.



Ryc. 4. Linia sejsmiczna 3D z rejonu złoża Tuligłowy prezentująca mechanizm powstawania pułapek gazu ziemnego w wyniku poddarcia warstw miocenu przed czołem nasunięcia karpacko-stebnickiego. W strefie złożowej zanik refleksów sejsmicznych

Fig. 4. The 3D seismic line from the Tuligłowy gas field area showing the uplifting of the Miocene strata below the Carpathian Skole Nappe. Note the dim out corresponding to the gas zone

Pułapki stratygraficzne

1. Ze względu na niedostateczną pionową rozdzielczość danych sejsmicznych w cienkowarstwowych osadach miocenu, większość informacji na temat pułapek stratygraficznych w formie wyklinowań pochodzi z odwiertów. Pułapki tego typu są znane m.in. ze złóż Husów (horyzonty 11 i 12). Ponadto istnienie tego typu pułapek, jako rozwiązania alternatywnego dla pułapek strukturalnych, jest domniemywane również w przypadku wielu takich złóż, gdzie stwierdzono szczególnie niską amplitudę zamknięcia, często nawet poniżej 5 m.

2. Pułapki stratygraficzne związane z powierzchniami niezgodności. W zapadlisku jest znanych kilka regionalnych i wiele lokalnych powierzchni niezgodności. Powierzchnią główną jest powierzchnia podmiocenińska. Szeroko rozprzestrzenione skały ilaste miocenu pełnią rolę uszczelnienia przede wszystkim dla niższych skał zbiornikowych podłoża, ale również i nasycone gazem utwory miocenu często wyklinowują się na podmiocenińskiej powierzchni niezgodności. Takie horyzonty gazonośne wyklinowujące się na zboczach wyniesień podłoża znane są m.in. ze złoża Tarnów. Podobnie najniższe horyzonty gazonośne złoża Rudka wyklinowują się na nadanhydrotowej powierzchni niezgodności (ryc. 8).

Dotychczas nie udowodniono istnienia złóż związanych bezpośrednio z podrzędnymi powierzchniami niezgodności. Wobec upadu warstw miocenu w zakresie od 0 do 5° wykrywanie takich powierzchni na profilach sejsmicznych jest trudne. Jednak włączenie do standardowego zestawu pomiarów geofizyki wiertniczej pomiarów upadomierza w znacznym

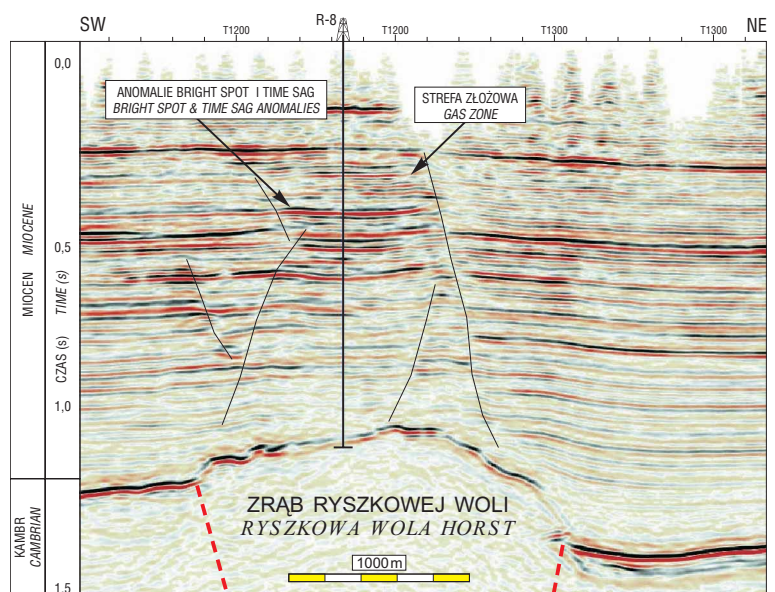
zakresie wspomogło interpretację podrzędnych i lokalnych nieciągłości kątowych. Dobrym przykładem jest odwiert Chałupki Dębnińskie 1, gdzie udowodniono zmienność planów strukturalnych i przesuwanie kulminacji struktury wraz ze wzrostem głębokości osadów. Zmiany te mogą być wywołane obecnością powierzchni niezgodności związanej z geodynamiczną przebudową zapadliska, zjawiskami tektoniki nieciągłej (wychylenie warstw, rotacja skrzydeł uskoku) oraz naturalnym w tej sytuacji różnym wpływem ukształtowania podłoża na sedymentację w zależności od miąższości osadów niższych. Istotny jest również wpływ na współczesną pozycję strukturalną zmian litologii (nierównomierna kompaktacja osadów piaszczystych i ilastych).

Jeśli wziąć pod uwagę częstość występowania i wielkość zasobów, głównym i najczęstszym typem pułapek dla gazu ziemnego w osadach miocenu zapadliska przedkarpackiego są antykliny kompakcyjne. Mniej częste, ale równie ważne ze względu na wielkość zawartych w nich zasobów gazu, są pułapki strukturalne związane z nasunięciem Karpat. Tylko w niektórych przypadkach jest możliwe opisanie pułapek strukturalnych związanych z uskokami, szczególnie takich, dla których jest to jedyny i główny sposób zamknięcia. Podobnie jest w przypadku pułapek stratygraficznych. Najczęściej takie sposoby zamykania pułapek towarzyszą i wspomagają geometryczny układ warstw wynikający z kompaktacji osadów miocenu ponad wyniesieniami podłoża.

Procesy migracji mikrobiального gazu ziemnego i napełniania pułapek

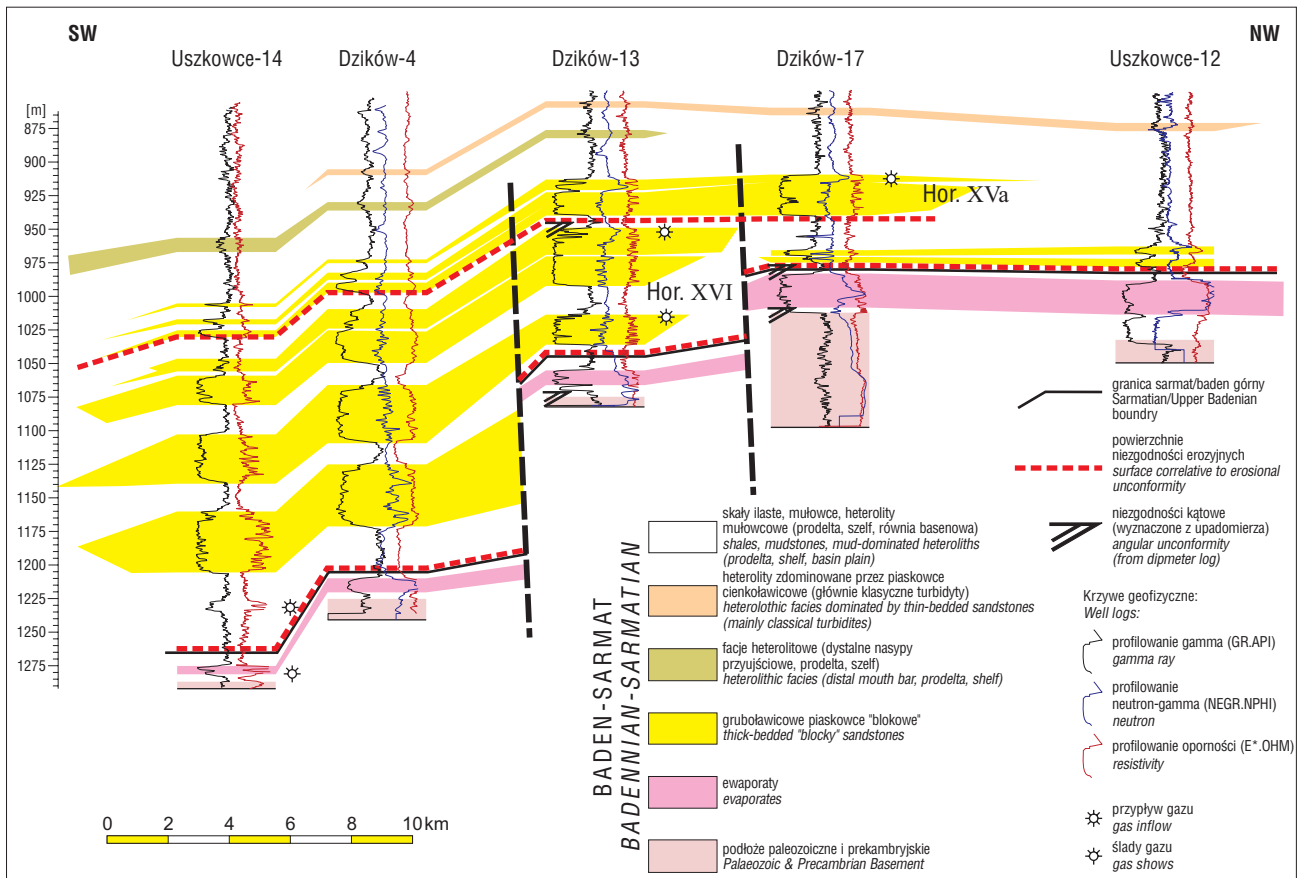
W czasie powstawania osadów miocenu były spełnione wszystkie warunki konieczne do generowania i akumulowania gazu biogenicznego, a więc:

- odpowiednia zawartość substancji organicznej;
- szybka sedymentacja osadów ilasto-piaszczystych w basenie morza miocenijskiego, a także jej cykliczność, co



Ryc. 5. Linia sejsmiczna przez złożo Rudka ponad zrębem Ryszkowej Woli. Przykład pułapki tektonicznej

Fig. 5. The seismic example showing the structural fault-related trap, the Rudka gas field over the Ryszkowa Wola horst



Ryc. 6. Korelacja pomiarów geofizyki wiertniczej przez złożo Dzików prezentująca położenie dzikowskich piaskowców blokowych w stosunku do systemu dyslokacji; pułapka złożona strukturalno-stratygraficzna (Porębski, 2000, raport niepublikowany)

Fig. 6. The well-log correlation across the Dzików gas field showing the trapping mechanism of the Miocene blocky sandstones, with complex structural-stratigraphic traps (after Porębski, 2000 — unpublished)

sprzyjało zarówno generowaniu metanu, jak i tworzeniu pułapek wielohoryzontowych;

— synsedymenacyjna tektonika i jednoczesne tworzenie pułapek w postaci kompakcyjnych antyklin ponad wyniesieniami podłoża;

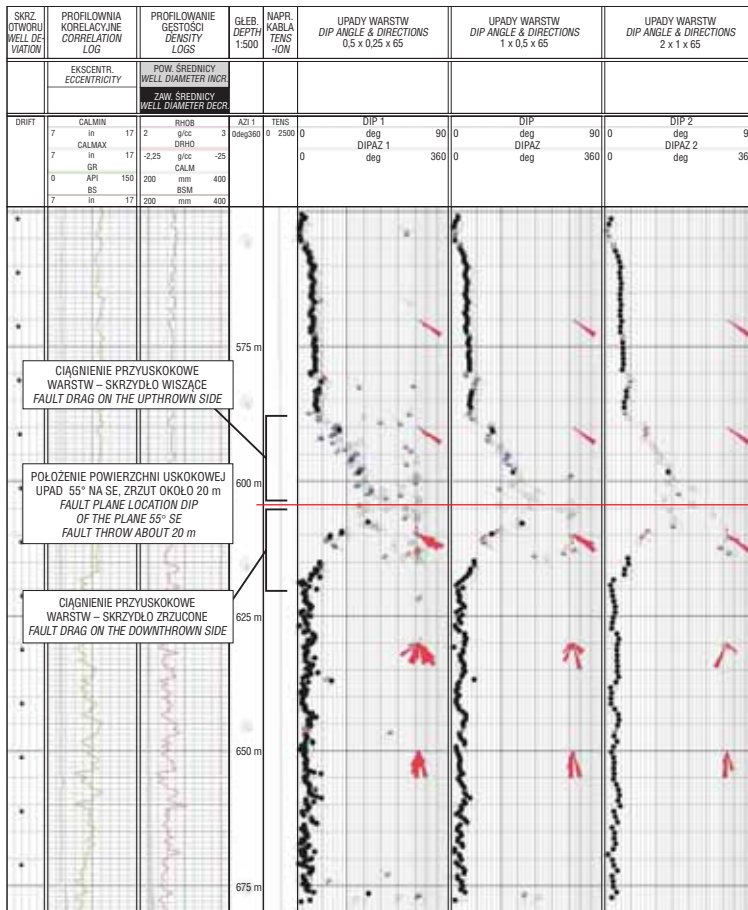
— obecność odpowiednich skał zbiornikowych oraz reżim niskotemperaturowy pozwalający na stałą obecność bakterii i nie powodujący znaczącej degradacji materii organicznej (Tissot i in., 1990).

Źródłem gazu ziemnego była rozproszona substancja organiczna. Badania geochemiczne wykazały obecność gazotwórczego kerogenu typu III (humusowego) z bardzo rzadką domieszką algowego kerogenu typu II. Zawartość całkowitego węgla organicznego (TOC) waha się od 0,02 do 3,22% wag. (średnia 0,69% wag.) (Kotarba, 1999). Warto dodać, że za potencjalne skały macierzyste w przypadku osadów drobnoklastycznych uważane są takie, które zawierają już od 0.5% wagowych TOC (Dickey, Hunt, 1972). Badania geochemiczne wykazały również podobne warunki depozycji substancji organicznej w całym profilu osadów autochtonicznych miocenu (Kotarba, 1999).

Konsekwencją mikrobialnej genezy gazu jest jego skład, w którym dominuje metan. W gazie ziemnym akumulowanym w utworach sarmatu jego objętość przekracza 98%, jedynie w gazie z warstw baranowskich oraz czasami z horyzontów położonych bezpośrednio ponad warstwami

baranowskimi zawartość azotu może być większa i przekracza nawet 30% (złożo Kuryłówka, horyzonty XI — 20,9%, XIa — 30,2%, XIIb — 29,6%, XIc — 31,3%, XII — 32,5%, złożo Sarzyna, odwiert S-17 — 17,5% z warstw baranowskich, S-18 — 17,5% z horyzontu ponad warstwami baranowskimi). W jednym przypadku w osadach oligocenu leżących pod warstwami baranowskimi stwierdzono gaz zawierający ok. 70% azotu z domieszką helu (0,695% obj., odwiert Luchów-3). Rzadko spotykany jest siarkowodor. Występuje on tylko w gazie z ewaporatowych skał zbiornikowych (np. odwiert Rożwienica-2, głębokość 1864–1889 w ilości 0,019% obj.). Stwierdzono go również w gazie z odwiertu Luchów-3, gdzie zawartość siarkowodoru wyniosła aż 0,101%.

Migracja biogenicznego gazu była procesem równoległym do jego powstawania (Kotarba, 1999). Sprzyjały jej procesy kompaktacji i wyciskania z zagęszczanego osadu nasycających je wód (Karnkowski, 1999). Drogami migracji mogły być z jednej strony porowate warstwy osadów piaszczystych (migracja lateralna zgodna z gradientem hydrodynamicznym), a z drugiej strony powierzchnie nieciągłości (spękania, uskoki — migracja pionowa). W szczególności dotyczy to systemu reaktywowanych, ekstensyjnych uskoków synsedymenacyjnych o kierunku NW–SE oraz uskoków ograniczonych do piaszczysto-ilastych osadów miocenu powstałych ponad



Ryc. 7. Przykład interpretacji uskoku normalnego z osadów miocenu na pomiarach upadomierza. Odwiert Grodzisko Dolne 3 nawiercił horyzonty złożowe zawadnione ze względu na położenie na zrzucionym skrzydle uskoku. Interpretacja parametrów uskoku P. Aleksandrowski (raport niepublikowany)

Fig. 7. The case of the normal fault with the throw about 20 m interpreted on the basis of dipmeter data. Depth 603 m, the dip of the fault plain is 55° to SE. The Grodzisko Dolne 3 well penetrated water-saturated gas horizons in spite of its location on the footwall. Interpretation P. Aleksandrowski (unpublished)

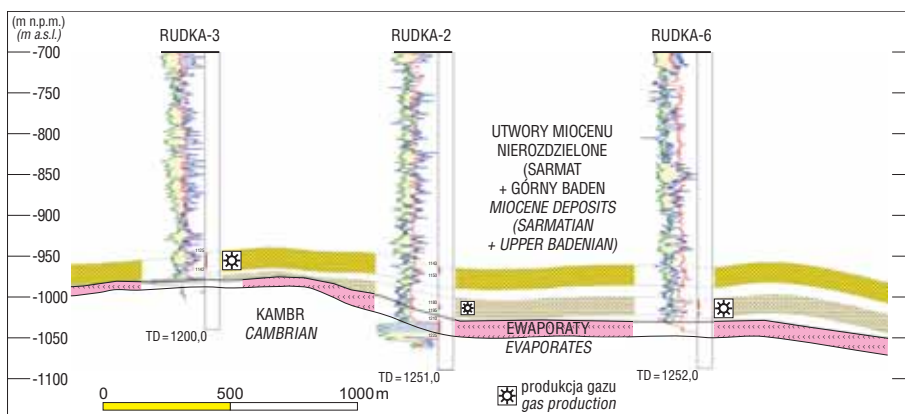
wyniesieniami w podłożu w wyniku nierównomiernej kompaktacji.

Za dowód migracji regionalnej jest uważane istnienie w północnej części zapadliska metasomatycznych litofacji osadów chemicznych. W wyniku ich przeobrażenia powstały wtórne wapienie pogipsowe i koncentracje siarki (Kubica, 1992). Zjawiska przeobrażenia były uwarunkowane jednoczesnym wystąpieniem kilku czynników: występowaniem skał siarkonośnych (siarczanów wapnia,

dehidrytów, anhidrytów), obecnością konserwującego i aktywizującego procesy przemian środowiska wodnego oraz przede wszystkim dopływ węglowodorów przy sprzyjających warunkach strukturalnych i przykryciem osadami nieprzepuszczalnymi (Kubica, 1992). Karnkowski przyjmuje, że metan dostarczyła regionalna migracja, która miała miejsce z centrum zbiornika ku północy, do płytszej części zapadliska (Karnkowski, 1999). Jej drogami zgodnie z regionalnym wzniosem skał były porowate warstwy piaszczyste oraz podłużne strefy dyslokacyjne o kierunku NW–SE.

W procesach przeobrażenia siarczanów biorą również udział bakterie — utleniając węglowodory do CO₂ redukują jony siarczanowe do H₂S wraz z zastępowaniem gipsu kalcytem (Kubica, 1992). W wyniku przeobrażenia ma miejsce doprowadzenie do skał siarczanowych pochodzącego z bituminów węgla i wodoru oraz odprowadzenie siarki i wody. Ze skały macierzystej nie ulega przemieszczeniu wapń, który po połączeniu z CO₂/CO₃ tworzy wapienie pogipsowe (Kubica, 1992). Podobnym procesom metasomatycznym podlegały również anhidryty. Wtórne wapienie poanhydrytowe charakteryzują się obecnością siarki rodzimej, i co jest ważne z punktu widzenia poszukiwań złóż węglowodorów, czasami znaczną wtórną porowatością (Myśliwiec, 2004c).

Jeśli wziąć pod uwagę dużą zmienność facjalną osadów miocenu, to bardzo prawdopodobna jest niezbyt odległa i lokalna migracja gazu z warstw ilastych do sąsiadujących zbiornikowych warstw piaszczystych. Co do przeobrażenia skał siarczanowych przy udziale gazu ziemnego, warto wspomnieć, że według Gąsiewicza (2000) zespół różnych cech siarkonośnych wapieni poselenitowych, jak również wyniki porównania wapieni z gipsami selenitowymi świadczą przeciw hipotezie ich pochodzenia epigenetycznego. Według przedstawionego modelu sedymentacyjno-diagenetycznego (Gąsiewicz, 2000) wapienie te rozwijały się w środowisku przejściowym morsko-meteorycznym, na granicy dwóch głównych stref depozycyjnych: wapiennej i gipsowej, w zmieniających się warunkach beztlenowo-tlenowych o złożonych reakcjach biochemicznych.



Ryc. 8. Pułapka typu stratygraficznego w postaci wyklinowania warstw zbiornikowych horyzontu XII złoża Rudka do nadanhydrytowej powierzchni niezgodności (Masłowski, 2003, niepublikowane)

Fig. 8. The case of the stratigraphic trap as the pinch out of the XII gas horizon of the Rudka gas field on the top of the evaporatic series (Masłowski, 2003, unpubl.)

Strefowość występowania złóż gazu ziemnego w utworach miocenu

Dla mikrobialnego gazu miocenijskiego skałami zbiornikowymi są badeńskie i sarmackie, piaszczyste osady stożków podmorskich, piaski i piaszkowce powstałe w środowisku deltowym oraz osady płytkiego szelfu/przybrzeża. Sporadycznie gaz występuje również w badeńskich anhydrytach oraz piaszkowcach warstw baranowskich (Myśliwiec, 2004c). Przestrzenny rozkład skał o dobrych właściwościach zbiornikowych jest w utworach miocenu dość równomierny, chociaż są i strefy, w których ich ilość jest wyraźnie mniejsza, jak np. rejon tzw. rowu Wielkich Oczu. Profil jest tam silnie zailony, a spotykane skały piaszczyste często mają podwyższoną (powyżej 15, a nawet 20%) zawartość węglanu wapnia, który skutecznie ogranicza porowatość, a w szczególności przepuszczalność.

W związku z dość równomiernym rozkładem skał zbiornikowych za główne czynniki powodujące strefowość występowania złóż należy uznać:

— sposób i intensywność ukształtowania stropu podłoża oraz

— deformujący wpływ ruchu nasuwczego Karpat.

Biorąc pod uwagę te czynniki, we wschodniej części zapadliska przedkarpackiego można wyróżnić pięć głównych stref występowania złóż w utworach miocenu (ryc. 1).

1. Strefa nasunięcia Karpat. Ciągnie się wzdłuż głównego nasunięcia od wschodniej granicy na zachód przez Pilzno, Tarnów i Bochnię. Zawiera złoża w pułapkach strukturalnych ekranowanych przez powierzchnię nasunięcia Karpat (złoża Przemyśl, Jaksmanice, Tuligłowy, Rączyna, Husów–Albigowa–Krasne, Nosówka, Sędziszów, Pilzno) lub w kompakcyjnych antyklinach położonych pod nasunięciem (złoża Jodłówka, Zalesie, Sędziszów, Kielanówka, Nosówka). Gaz występuje w utworach ilasto-piaszczystych sarmatu dolnego, a rzadziej w osadach górnego badenu. Najczęściej są to osady podmorskich stożków, a w wyższej części profilu osady deltowe. W głębszych horyzontach prócz wysokometanowego gazu spotyka się wyższe węglowodory gazowe, a nawet lekkie węglowodory ciekłe. Poszukiwania oparte są o metodę strukturalną. Są one trudne i kosztowne, ale jednocześnie strefa ta jest wysoko efektywna i zawiera większość zasobów gazu zapadliska.

2. Strefa Kańczuga–Rzeszów. Podłoże w tej strefie jest wyjątkowo silnie zróżnicowane i poprzecinane głębokimi, otwartymi w kierunku południowym paleodolinami powstałymi w wyniku erozji w czasie późnej kredy–paleogenu (ryc. 8). Strop podłoża obniża się w kierunku południowym, przy jednoczesnym zwiększaniu intensywności rzeźby. W porównaniu z resztą obszaru wschodniej części zapadliska, na większym obszarze brak jest tutaj osadów anhydrytowych (tzw. wyspa rzeszowska, Komorowska–Błaszczynska, 1965). Głównymi typami pułapek gazu są wielohoryzontowe antykliny kompakcyjne w osadach sarmatu, głównie turbidytach i osadach deltowych (złoża Kańczuga, Smolarzyny, Palikówka, Terliczka, Stobierna, Jasionka, Kąty Rakszawskie, Wola Zarczycka, Sokołów i in.). Podobnie jak w strefie przy nasunięciu gaz z głębszych horyzontów zawiera śladowe ilości węglowod

orów ciekłych. Wiele złóż odkryto tutaj dzięki bezpośrednim wskaźnikom węglowodorów na sekcjach sejsmicznych (anomalia amplitudowe typu *bright spot* oraz ugięcia refleksów sejsmicznych typu *time sag*, Myśliwiec, 2004a, 2004b; Myśliwiec i in., 2004). W strefie tej zidentyfikowano również wiele anomalii sejsmicznych, potencjalnych złóż gazu ziemnego (Borys & Myśliwiec, 1999, 2000).

3. Strefa centralna. Obejmuje obszar położony na południowy-wschód od zrębu Ryszkowej Woli. Stropowa powierzchnia podłoża jest tutaj mniej zróżnicowana, brak jest głęboko wciętych paleodolin, natomiast w podłożu występują podłużne uskoki o kierunku NW–SE (uskok złoża Jarosław, złoża Miocin, uskoki Wola Buchowska–Gorzyce) oraz uskoki poprzeczne o kierunku SW–NE (udokumentowane m.in. w rejonie Żołyni). Większość obszaru pokrywa poziom anhydrytowy. Strefa graniczy w części bardziej zachodniej ze strefą Kańczuga–Rzeszów, przechodząc w obszar paleodolin, natomiast w części wschodniej poprzez dyslokacje zrzucające podłoże o kilkaset metrów na linii Pruchnik–Węgierka–Tuligłowy–Przemyśl graniczy ze strefą pod nasunięciem Karpat.

W strefie centralnej na pograniczu ze strefą pociętą paleodolinami odkryto złoża w antyklinach kompakcyjnych ponad wyniesieniami podłoża (złoża Żołynia–Leżajsk, Chałupki Dębnińskie, Grodzisko Dolne, Tryńcza), natomiast bardziej na wschód jest zauważalny związek występowania złóż z dużymi uskokami w podłożu (złoża Jarosław i Miocin). W przypadku części akumulacji udokumentowano związek pomiędzy zamknięciami a dyslokacjami (Grodzisko Dolne). Głównymi skałami zbiornikowymi są deltowe osady piaszczyste oraz osady płytkiego szelfu/przybrzeża, rzadziej osady stożków podmorskich.

4. Strefa nad zrębem Ryszkowej Woli. Zrąb Ryszkowej Woli ciągnie się od granicy z Ukrainą w kierunku NW na odcinku ok. 60 km. Złoża występujące w osadach miocenu nad zrębem występują głównie w kompakcyjnych antyklinach (złoża Kuryłówka, Sarzyna, Ryszkowa Wola, Chotyniec), ekranowanych również tektonicznie (złożo Rudka). Skałami zbiornikowymi są głównie piaszczyste warstwy osadów deltowych, rzadziej również dystalne turbidyty oraz warstwy baranowskie (Kuryłówka, Sarzyna). Gaz z sarmatu jest typowym gazem wysokometanowym, natomiast gaz z warstw baranowskich zawiera podwyższoną, dochodzącą do dwudziestu kilku procent ilość azotu.

5. Strefa północna. Rozpoczyna się przy granicy z Ukrainą silnie zdyslokowanym wyniesieniem Lubaczowa — zrębem obciętym od południa systemem dyslokacji Wielkich Oczu z sumarycznym zrzutem sięgającym 2000 m. Ku północy zrąb Lubaczowa–Uszkowców przechodzi przez wiele stopni tektonicznych ku synklinorium Lubelskiemu. Podłoże utworów miocenu jest zbudowane ze skał paleozoiku (kambr, ordowik i sylur) oraz mezozoiku (jura i kreda). Gaz ziemny, a również i małe ilości ropy występują zarówno w podłożu, jaki i w utworach miocenu (złoża ropy i gazu Lubaczów i Uszkowce, złożo ropy Cetynia). Skałami zbiornikowymi są tutaj, oprócz osadów sarmatu, również warstwy baranowskie, seria anhydrytowa oraz jurajskie skały podłoża.

Od zrębu Lubaczowa, przez rejon Dzikowa w kierunku NW występuje ciąg wydłużonych, tektoniczno-erozyjnych wyniesień podłoża, ponad którymi, na podstawie interpretacji anomalii sejsmicznych odkryto wiele złóż w antyklinalach kompakcyjnych (złoża Dzików, Wola Obszańska, Książpol, Łukowa, Biszcz; Borys i in., 2000; Myśliwiec i in., 1999, Myśliwiec, 2004a, 2004b). Strop podłoża miocenu wznosi się tutaj w kierunku północno-wschodnim, podczas gdy warstwy serii osadów miocenu wznoszą się przeważnie w kierunku przeciwnym.

Wśród wydzielonych stref pod względem zasobów najważniejsza jest strefa nasunięcia. Odkryto tutaj łącznie 111,6 mld Nm³ gazu, co stanowi ok. 72% całości gazu zapadliska. Decydujące znaczenie mają oczywiście zasoby największego złoża gazu odkrytego w Polsce — Przemyśl. W rejonie tzw. Pola Gazu Ziarnego Przemyśl (złoża Przemyśl, Wapowce, Jaksmanice, Maćkowiec, Tuligłowy) udokumentowano łącznie 78,9 mld Nm³. Strefa ta nadal pozostaje wysoce perspektywiczna. W strefie Kańczuga-Rzeszów odkryte zasoby wynoszą 5,6 mld Nm³, przy czym prawie połowę tych zasobów odkryto w ostatnich latach na podstawie interpretacji anomalii sejsmicznych. Obecnie prowadzone prace poszukiwawcze dają nadzieje na dalsze znaczące odkrycia. Podobnie dobre wyniki uzyskiwane są w strefie centralnej, głównie o otoczeniu złoża Żołyń. Dotyczą one tak nowych rejonów, jak i nierozpoznanych dotychczas głębszych partii utworów miocenu w strefach eksploatowanych płytkich złóż. Łącznie w strefie tej odkryto ok. 20 mld Nm³ gazu, co stanowi ok. 13% zasobów w miocenie zapadliska.

Najmniej zasobną jest strefa ponad zrębem Ryszkowej Woli, gdzie odkryte zasoby wynoszą zaledwie 1,4 mld Nm³. W położonej na północ od zrębu Ryszkowej Woli strefie północnej odkryto w ostatnich latach kilka złóż o sumarycznych zasobach ok. 5,5 mld Nm³ gazu. Łącznie z gazem ze złóż odkrytych wcześniej daje to ok. 16,6 mld Nm³. Ważnym problemem poszukiwawczym pozostaje w tej strefie m.in. zbadanie zasięgu piaskowców dzikowskich oraz strefy płytkich osadów miocenu na północ od rejonu złoża Lubaczów.

Literatura

- BORYS Z., MYŚLIWIEC M. & TRYGAR H. 2000 — New Gas Discoveries in the Carpathian Foredeep, Poland, As the Result of the Seismic Anomalies Interpretation. Oil and Gas News from Poland, 10: 69–80.
- BORYS Z. & MYŚLIWIEC M. 2000 — Kierunki poprawy efektywności poszukiwań w zapadlisku przedkarpackim. Nafta-Gaz, 9: 457–465.
- CISEK B. & CZERNICKI J. 1964 — Występowanie siarki w poziomie osadów chemicznych tortonu dolnego na Przedgórzu Karpat w rejonie Rokietnica-Mirocin-Jarosław-Kańczuga jako ważny wskaźnik w poszukiwaniach bituminów. Geologia i Geofizyka Naftowa, No 10–12.
- CZERNICKI J. 1977 — Warunki geologiczno-strukturalne pułapek i parametry złóż gazu ziemnego w miocenie autochtonicznym w strefie nasunięcia Karpat między Rzeszowem a Przemyślem. Wyd.Geol.
- DICKEY P. A. & HUNT J. M. 1972 — Geochemical and hydrogeological methods of prospecting for stratigraphic traps. AAPG Memoir. 16: 136–167.
- GAŚIEWICZ A. 2000 — Sedymentologia i diagenaza wapieni poseleńitowych a model genetyczny polskich złóż siarki rodzimej. Pr. Państw. Inst. Geol., 172: 1–143.
- KARNKOWSKI P. 1999 — Oil and gas deposits in Poland, The Geosynoptics Society "GEOS", Kraków, 1–379.
- KARNKOWSKI P.H. & OZIMKOWSKI W. 1998 — The distribution of oil- and gasfields in relation to satellite image interpretation: an example from the Polish East Carpathians and the adjacent foredeep. J. Petroleum Geology, 21: 213–231.
- KARNKOWSKI P.H. & OZIMKOWSKI W. 2001 — Migracja i akumulacja gazu ziemnego w zapadlisku przedkarpackim: mechanizm i czynniki kontrolujące, Prz. Geol., 49: 461–462.
- KOMOROWSKA-BŁASZCZYŃSKA M. 1965 — The Anhydrite-less Island in the Profiles of the Rzeszow Foreland. Bull. Acad. Pol. Sc., Geology, 13.
- KRZYWIEC P. 1999 — Miocenna ewolucja tektoniczna wschodniej części zapadliska przedkarpackiego (Przemyśl-Lubaczów) w świetle interpretacji danych sejsmicznych. Pr. Państw. Inst. Geol., 168: 249–273.
- KOTARBA M. J. 1999 — Warunki generowania i akumulacji węglowodorów oraz charakterystyka geochemiczna substancji organicznej w utworach miocenu autochtonicznego zapadliska przedkarpackiego. Pr. Państw. Inst. Geol., 168: 277–295.
- KUBICA B. 1992 — Rozwój facjalny osadów chemicznych badenu w północnej części zapadliska przedkarpackiego, Pr. Państw. Inst. Geol., 133: 1–64.
- MYŚLIWIEC M. 1998 — The presence of the normal faults and their relationships to gas accumulation, the Polish Carpathian Foredeep. EAGE 58th Conference and Technical Exhibition, Extended Abstracts, Volume 2, Amsterdam.
- MYŚLIWIEC, M., BORYS Z. & TRYGAR H. 1999 — New Gas Discoveries in the Carpathian Foredeep, Poland, as the Result of the Seismic Anomalies Interpretation. 61st Conference and Technical Exhibition, Extended Abstracts, Vol. 1, Helsinki.
- MYŚLIWIEC M. 2004a — Poszukiwania złóż gazu ziemnego w osadach miocenu zapadliska przedkarpackiego na podstawie interpretacji anomalii sejsmicznych — podstawy fizyczne i dotychczasowe wyniki. Prz. Geol., 52: 299–306.
- MYŚLIWIEC M. 2004b — Poszukiwania złóż gazu ziemnego w osadach miocenu zapadliska przedkarpackiego na podstawie interpretacji anomalii sejsmicznych — weryfikacja anomalii. Prz. Geol., 52: 307–314.
- MYŚLIWIEC M. 2004c — Miocenne skały zbiornikowe zapadliska przedkarpackiego. Prz.Geol., 52: 581–592.
- MYŚLIWIEC M., PLEZIA B. & ŚWIĘTNIĆKA G. 2004 — Nowe odkrycia złóż gazu ziemnego w osadach miocenu północno-wschodniej części zapadliska przedkarpackiego na podstawie interpretacji bezpośredniego wpływu nasycenia węglowodorami na zapis sejsmiczny. Prz. Geol., 52: 395–402.
- MYŚLIWIEC M., MADEJ K. & BYŚ I. 2004 — Złoża gazu ziemnego w osadach miocenu rejonu Rzeszowa (zapadlisko przedkarpackie) odkryte w oparciu o wyniki nowoczesnej kompleksowej interpretacji danych sejsmicznych. Prz. Geol., 52: 501–506.
- NEY R., BURZEWSKI W., BACHLEDA T., GÓRECKI W., JAKÓBCZAK K. & SKUPCZYŃSKI K. 1974 — Zarys paleogeografii i rozwoju litologiczno-facjalnego utworów miocenu zapadliska przedkarpackiego. Pr. Geologiczne PAN, 82: 1–51.
- SZAFRAN S. 1980 — Rozwój facjalny i układ przestrzenny oraz gazoność utworów miocenu autochtonicznego we wschodniej części zapadliska przedkarpackiego na podstawie korelacji profilowań geofizycznych. Pr. Geologiczne PAN, 120: 1–43.
- TISSOT B., MATTAVELLI L. & BROSSE E. 1990 — Trends in Organic Geochemistry and Petroleum in Italy. Deposition of Organic Facies, AAPG Studies in Geology, Tulsa, 30: 161–179.
- ZUBRZYCKI A. 1986 — Analiza facjalna i rozwój pułapek litologicznych w utworach miocenu autochtonicznego zapadliska przedkarpackiego między Rzeszowem a Pilznem. Pr. Geologiczne PAN, 131: 1–37.