



Granice złóż gazu ziemnego Lachowice i Stryszawa w świetle testów rurowym próbnikiem złoża

Stanisław Dubiel¹, Mirosław Rzyczniak¹, Marek L. Solecki¹, Michał Maruta¹



S. Dubiel



M. Rzyczniak



M. L. Solecki



M. Maruta

Boundaries of the Lachowice and Stryszawa gas deposits in view of DST tests. *Prz. Geol.*, 63: 60–66.

Abstract. Identification of hydrocarbon accumulation boundaries within an oil field area is an important factor for making decisions whether or not to drill out and develop the field, or to give up extraction in some parts of the areas. As an example, two gas/condensate fields in the Devonian strata of the Western Carpathians are presented in this paper. These deposits were found at various depths in the Miocene basement in two separate tectonic blocks. Boundaries of

the Stryszawa field were identified with the traditional Horner method and with the modern log-log method on the basis of industrial data obtained with DST and production tests. Based on the analysis of the drilling-up and testing methods used in the L-4 well in the Devonian strata of the Lachowice field the authors formulated the causes of considerably lower inflow of reservoir fluid to the tester during four DST tests, and the inability to determine boundaries of this part of the deposit.

Keywords: Western Carpathians, DST, log-log method, Stryszawa and Lachowice gas deposits

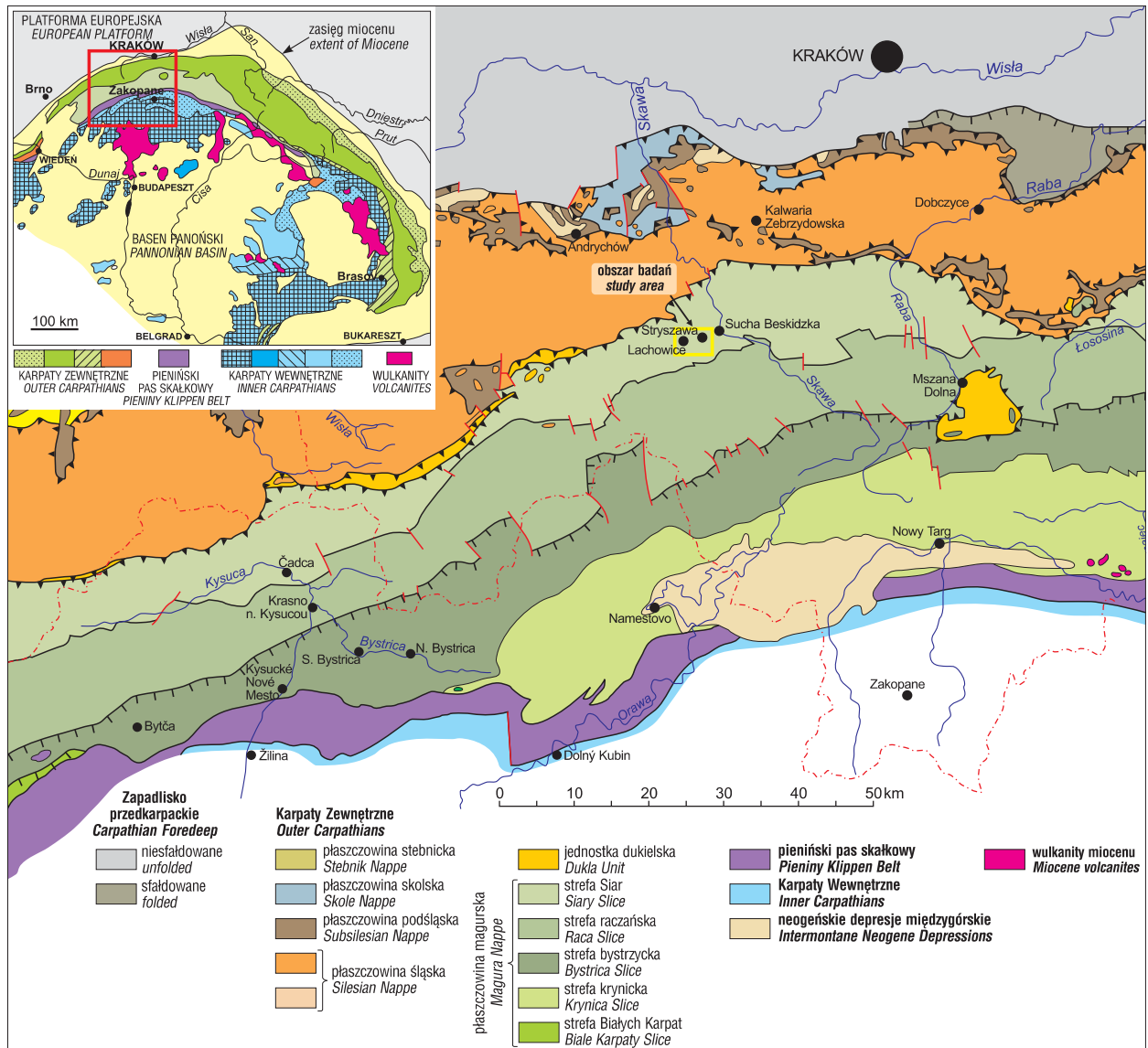
Wzrastające zapotrzebowanie energetyczne kraju może stanowić podstawę realizacji poszukiwań naftowych w obszarach występowania konwencjonalnych złóż gazu ziemnego. Do nich należy zaliczyć Karpaty Zachodnie (ryc. 1, 2), w których w podłożu osadów miocenu, zalegają gazonośne utwory dewonu (Dubiel i in., 1993–1998; Baran i in., 1997; Jawor, 1997). Odwiertami L-1, L-7 i S-2K stwierdzono ponad wszelką wątpliwość występowanie dwóch złóż gazu ziemnego o wartości komercyjnej, które nie są w pełni rozpoznane (Dubiel i in., 1993–1998). Złoża te występują na dwóch oddzielnych blokach tektonicznych Lachowice i Stryszawa, zalegających na różnych głębokościach. W podłożu miocenu, na bloku Lachowice strop dewonu nawiercono na głębokości 3950 m, a na bloku Stryszawy – na głębokości 2757 m. W obydwu złożach akumulacja gazu ziemnego występuje w dewońskich skałach węglanowych (wapienie, wapienie dolomitowe, dolomity) o wtórnej porowatości, związanej z rozwojem makro- i mikroszczelin oraz kawern w sąsiedztwie stref dyslokacyjnych. Badania laboratoryjne próbek wapieni dewońskich z rdzeni wiertniczych wykazały ich porowatość rzędu 1,0–1,9% i przepuszczalność 0,9–1,6 mD, natomiast próbki z rdzeni utworów dolomitowych cechowała porowatość od 1,0 do 8,8% i przepuszczalność do 31 mD. Określona badaniami geofizyki otworowej w odwiertach L-7 i L-4 średnia porowatość utworów dewonu waha się w granicach 1,5–2,5%, a w strefach zdolomityzowanych wynosiła przeciętnie 5%. W odwiercie S-2K, na głębokości 3255–3265 m, stwierdzono podwyższoną porowatość skał dewonu, wynoszącą średnio 15%, związaną ze strefą przyuskokową, a ich przepuszczalność gazu, określona na podstawie testu DST, wynosi około 2,5 mD. W odwiercie L-1 miąższość utworów węglanowych dewonu górnego i środkowego wynosi 170 m, natomiast w otworze L-3a nawiercono tylko 50 m dolnej części dewonu środkowego, z

powodu dużego erozyjnego ścienia utworów dewonu środkowego i górnego (ryc. 3). Akumulacja gazu ziemnego Stryszawa została udokumentowana odwiertami L-7 oraz S-2K. Udokumentowane złoża gazu ziemnego Lachowice i Stryszawa stanowią łączne zasoby geologiczne 830 mln m³ gazu, w tym zasoby wydobywalne oceniono na 240 mln m³ w kategorii rozpoznania złoża B oraz 430 mln m³ w kategorii C. Na podstawie danych z dwóch testów złożowych oraz testu produkcyjnego utworów dewonu i kambru w odwiercie S-2K możliwa była identyfikacja granic złoża Stryszawa, z zastosowaniem metody log-log.

Dużą rolę w odkryciu tych dwóch oddzielnych złóż gazu ziemnego odegrały ogólne i szczegółowe rezultaty testów rurowymi próbnikami złoża (ang. *Drill Stem Test* – DST). Polegały one na wywołaniu krótkotrwałej eksploatacji złoża w czasie kilkudziesięciu minut (test przyływu) oraz odbudowy ciśnienia dennego trwającej od około jednej do kilku godzin (test odbudowy ciśnienia dennego), przy równoczesnej rejestracji wykresów zmian ciśnienia dennego w funkcji czasu. W przypadkach, gdy podczas testu przyływu syfonowano gaz ziemny z odwiertu, czas tego testu trwał kilka godzin (Dubiel i in., 1993–1998).

Rezultaty dwucyklowych oraz wielocyklowych testów złożowych DST, uzyskane przez PNiG Kraków, charakteryzują się znacznym stopniem wiarygodności, w wyniku zastosowania nowoczesnych próbników złoża firmy Halliburton typu Ful-Flo (Composite..., 1986–1987; Dubiel i in., 1993–1998; Dubiel, 2011). Próbniki typu Ful-Flo umożliwiają stosowanie szerokiego zakresu rozwiązań technologicznych, gdyż charakteryzują się pełną przelotowością całego zestawu, pozwalającą na zapuszczenie przez zestaw narzędzi, przyrządów oraz ładunków perforacyjnych. Próbniki tego typu pozwalają na prowadzenie testów wielocyklowych, obejmujących syfonowanie gazu ziemnego z odwiertu.

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; sdubiel@agh.edu.pl; rzyczniak@agh.edu.pl; mlssolecki@agh.edu.pl; maruta@agh.edu.pl.



Ryc. 1. Obszar badań na tle fragmentu mapy jednostek geologicznych Karpat Zachodnich (wg Żytka i in., 1988; Świerczewskiej, 2005), żółtym prostokątem zaznaczono obszar badań

Fig. 1. The study area on the background of a map of geological units of the Western Carpathians (after Żytka et al., 1988, Świerczewska, 2005), a study area marked by yellow rectangle

Są one stosowane głównie do testów DST w odwiertach orurowanych, a dzięki zastosowaniu pakera typu RTTS z hydraulicznymi szczękami, również do wykonywania testów produkcyjnych oraz zabiegów intensyfikacji przepływu płynu złożowego (np. kwasowania skał węglanowych).

Rezultaty testów DST wykonywanych na złożach Lachowice i Stryszawa pod koniec lat 90. XX w., autorzy interpretowali tradycyjną metodą Hornera w półlogarytmicznym układzie współrzędnych (Horner, 1951; Dubiel i in., 2003) oraz nowoczesną metodą log-log. Metoda ta polega na porównywaniu rzeczywistych i modelowych (diagnostycznych) wykresów przyrostów ciśnienia oraz wykresów pierwszej pochodnej przyrostów ciśnienia w funkcji czasu, w układzie podwójnie logarytmicznym (Materiały..., 1993; Dubiel i in., 2003). Wykresy diagnostyczne zostały opracowane z uwzględnieniem modelu złoża, modelu udostępnienia złoża oraz modelu granicy złoża dla zakresu interpretacyjnego programu Saphir 202B, francuskiej firmy Kappa (Materiały..., 1993–1995; Oprogramowanie..., 1993–1995).

Celem publikacji jest:

– porównanie wyników identyfikacji granic złoża gazu

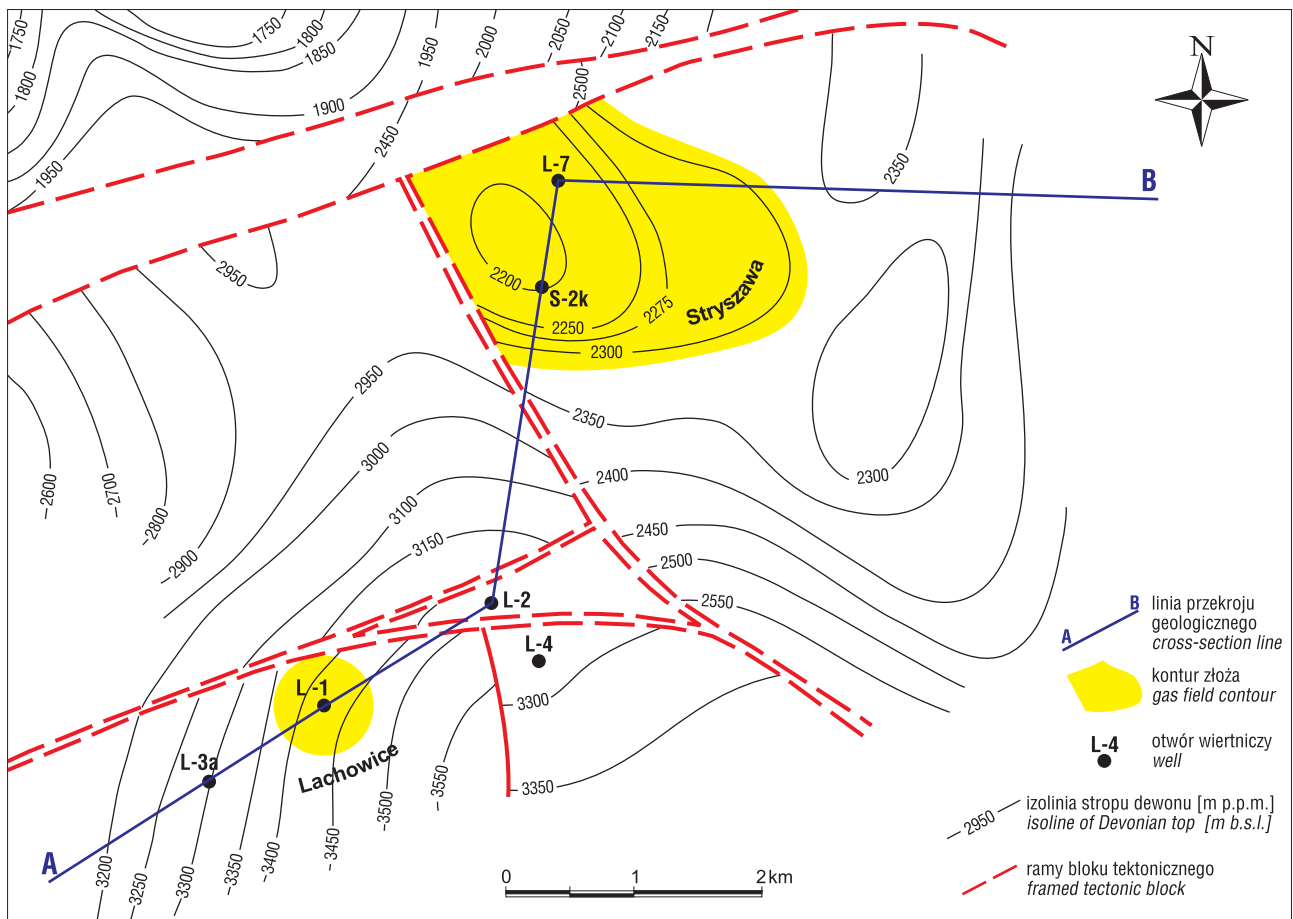
ziemnego Lachowice, uzyskanych różnymi metodami, z włączeniem własnych interpretacji danych z testów DST;

– wskazanie ograniczeń w stosowaniu tych metod, stwierdzonych przez autorów w złożu Lachowice, zwłaszcza w przypadkach dużej kolmatacji skał zbiornikowych w procesie dowiercania złoża oraz skraplania się węglowodorów cięższych od metanu, w skałach strefy przyodwiertowej, co wystąpiło w otworze L-4;

– przedstawienie wyników analiz i reinterpretacji danych z testów DST na złożach Stryszawa i Lachowice, jako przykładu do wykorzystania tej metody przy identyfikacji granic akumulacji węglowodorów w innych obszarach poszukiwań naftowych.

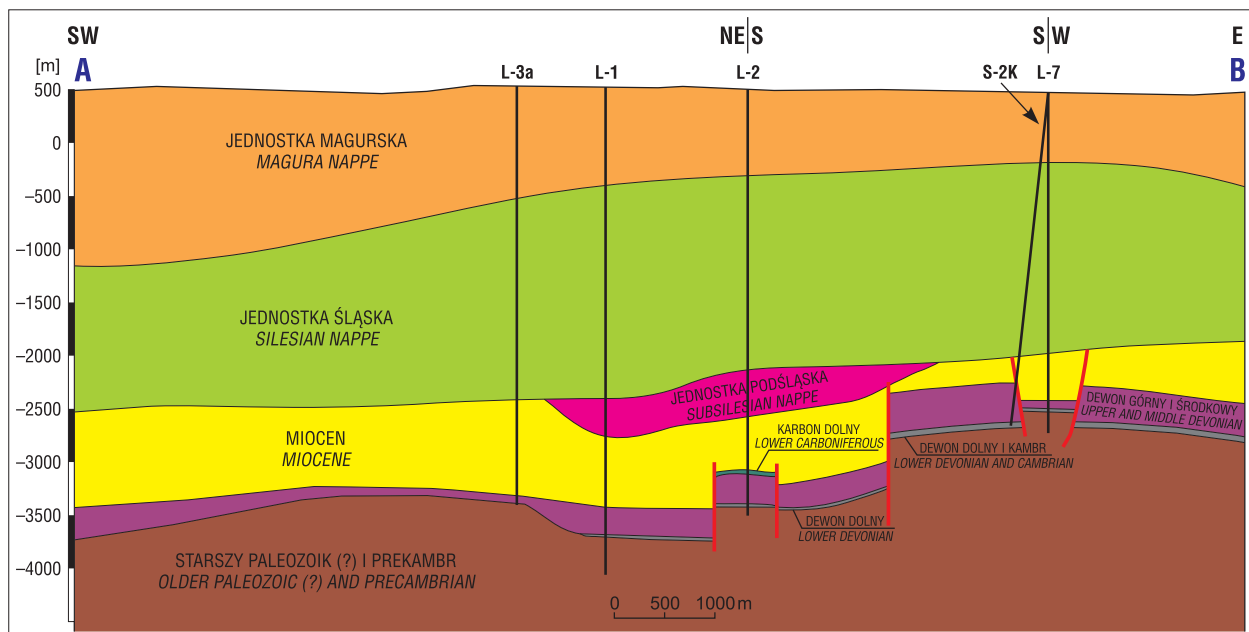
ROZPOZNAWANIE GRANIC ZŁOŻA NA PODSTAWIE REZULTATÓW WIERCEŃ ORAZ BADAŃ HYDRODYNAMICZNYCH W ODWIERTACH

Granice złoża gazu ziemnego Lachowice (wyznaczonych uskokuw, stref dyslokacyjnych i wyklinowań) identyfikowano w przemyśle głównie na podstawie interpretacji



Ryc. 2. Mapa strukturalna stropu dewonu w obszarze złóż gazu ziemnego Lachowice i Stryszawa w Karpatach Zachodnich (wg Barana i in., 1997; zmodyfikowane)

Fig. 2. Structural map of the top-Devonian surface in the area of Lachowice and Stryszawa natural gas field, Western Carpathians (after Baran et al., 1997; modified)



Ryc. 3. Przekrój geologiczny przez odwierty L-3a, L-1, L-2, S-2K, L-7 (wg Jawora, 1997; zmodyfikowane i uzupełnione)

Fig. 3. Geological cross section of L-3a, L-1, L-2, S-2K, L-7 wells (after Jawor, 1997; modified and amended)

danych z wierceń (zwierciny, rdzenie wiertnicze, objawy płynu złożowego w płuczkach wiertniczej, ucieczki płuczki). W przypadku rozpoznawania granic złoża gazu ziemnego Stryszawa wykorzystano wyniki badań hydrodynamicznych w odwiercie S-2K (test DST oraz test produkcyjny),

które interpretowano metodą log-log. Nie używano do tego celu metody Hornera (Dubiel i in., 1993–1998).

Na złożu Lachowice w latach 90. XX w. wykonano kilka odwiertów geologiczno-poszukiwawczych udostępniających to złożo, którymi uzyskano ogólne (przybliżone)

lub szczegółowe informacje złożowe oraz o występowaniu granic złoża).

Odwiertem L-1 odkryto złożo gazu ziemnego Lachowice oraz uzyskano dane geologiczno-wiertnicze umożliwiające wyznaczenie profilu geologicznego tego odwiertu. W odwiercie tym wykonano dwa testy DST – jeden w nieorurowanym interwale głęb. 3952–4122 m, a drugi selektywnie, w interwale orurowanym i perforowanym, w utworach dewonu na głęb. 3955–4060 m. Rezultaty testów DST (obecnie niedostępne), nie były jednak interpretowane pod kątem występowania granic złoża. Odwiertem L-2 uzyskano dane geologiczno-wiertnicze umożliwiające wyznaczenie profilu oraz strefy dyslokacyjnej ustalonej głównie na podstawie niezgodności zalegania warstw oraz słabego uzysku rdzeni wiertniczych silnie zlustrowanych i spękanych. Rezultaty testu DST utworów dewonu uzyskane w tym odwiercie nie były interpretowane pod kątem lokalizacji granic złoża. Odwiertem L-3a potwierdzono przepływ gazu ziemnego (gazolinowego) oraz objawy ropy naftowej. Nawiercono tutaj jednak tylko około 50 m dolnej części osadów dewonu środkowego, a wyższa część, odpowiadająca serii złożowej w odwiercie L-1, została zerodowana. Kierunkowym odwiertem S-1K stwierdzono m.in. erozję profilu w tej części dewonu, związaną prawdopodobnie ze strefą tektoniczną Żywiec–Rzeszotary. Wzdłuż tej strefy rozciąga się, udokumentowany na podstawie prac sejsmicznych, ciąg bloków tektonicznych, z których blok tektoniczny Stryszawy, stwierdzony odwiertem L-7, zawiera akumulację gazu ziemnego z gazoliną. Blok

ten występuje w podobnych warunkach geologicznych, ale około 1000 m głębiej niż złożo Lachowice (Baran i in., 1997; Jawor, 1997). W odwiercie L-7 wykonano łącznie 11 testów DST, ale z tej liczby tylko wyniki jednego testu (DST nr 117/94) były interpretowane metodą log-log pod kątem występowania granicy złoża (tab. 1). Dzięki temu uzyskano informację o występowaniu granicy tego złoża w postaci uskoku uszczelniającego o stałym ciśnieniu. W odwiercie S-2K wykonano dwa testy DST (nr 8/97 i 32/97 – PNiG Kraków) utworów dewonu i kambru oraz test produkcyjny (nr S-2KB/97 – O/ZGNiG Krosno). Autorzy stwierdzili metodą Hornera i metodą log-log występowanie strefy dyslokacji w gazonośnych utworach dewonu, w niewielkiej odległości od odwiertu S-2K oraz występowanie granicy złoża w wodonośnych utworach kambru (tab. 1).

ZASTOSOWANIE METODY HORNERA

Interpretację rezultatów testów DST metodą Hornera pod kątem występowania granicy złoża Stryszawa przedstawiono na rycinach 4 i 5. Na rycinie 4 zamieszczono wykres ciśnienia dennego zarejestrowany w czasie testu DST dewonu (3255–3265 m) w odwiercie S-2K.

Szczegółową interpretację wykresu drugiego testu odbudowy ciśnienia dennego (ryc. 4. odcinek H–M), pod kątem wyznaczania granicy złoża metodą Hornera, zamieszczono na rycinie 5. Na podstawie danych z rycin 4 oraz wyników testu DST nr 8/97 obliczono tą metodą

Tab. 1. Zestawienie informacji dotyczących rozpoznania złożowego oraz granic złoża gazu ziemnego w Karpatach Zachodnich (Dubiel i in., 1993–1998; Baran i in., 1997; Jawor, 1997)

Table 1. General data on the gas fields and their boundaries in the Western Carpathians (Dubiel et al., 1993–1998; Baran et al., 1997; Jawor, 1997)

L.p. No.	Symbol odwiertu Borehole symbol	Nr testu DST (interwał) Test DST No. (interval)	Informacje ogólne uzyskane z wierceń Drilling data	Informacje szczegółowe uzyskane metodą log-log Log-log method data	Uwagi Remarks
1	L-1	dewon /Devonian (3952–4122 m)	odkrycie złoża gazu ziemnego Lachowice discovery of Lachowice oil and gas deposit	brak interpretacji no interpretation	potencjalne wydobycie gazu potential gas production 143–179 m ³ /min
2	L-2	dewon /Devonian (3618–4060 m)	stwierdzona niezgodność zalegania warstw disconformity	brak interpretacji no interpretation	–
3	L-3a	dewon /Devonian (3847–3930 m)	potwierdzenie przepływu gazu z objawami ropy gas flow with oil shows	brak danych no data	–
4	L-4	175/93; 2/94; 6/94; 10/94; 16/97; dewon /Devonian (3797–4020 m)	stwierdzona niezgodność zalegania warstw disconformity	brak możliwości diagnozowania inability to diagnose	dominacja skin-efektu skin-effect domination
5	L-7	117/94; dewon /Devonian (2875–2877 m)	odkrycie złoża gazu Stryszawa discovery of Stryszawa gas deposit	uskok L = 154 m fault	granica o stałym ciśnieniu constant pressure boundary
6		8/97; dewon /Devonian (3255–3265 m)	metodą Hornera zdiagnozowano granicę złoża, L = 5 m (ryc. 5) deposit boundary (Fig. 5)	granica złoża w postaci wieloboku polygonal deposit boundary	intensywne ucieczki płuczki w strefę dyslokacyjną mud escape into fault zone
7	S-2K	S-KB/97; dewon /Devonian (3263–3272)	test produkcyjny odwiertu gazowego production test of gas borehole	granica złoża w kształcie trójboku (ryc. 7) triangular deposit boundary (Fig. 7)	L1 = 6,7 m L2 = 9,5 m L3 = 13,4 m
8		32/97 kambur /Cambrian (3286–3292 m)	stwierdzono występowanie wody złożowej i gazu formation water and gas	uskok, L = 152 m (ryc. 6) fault (Fig. 6)	granica o stałym ciśnieniu constant pressure boundary

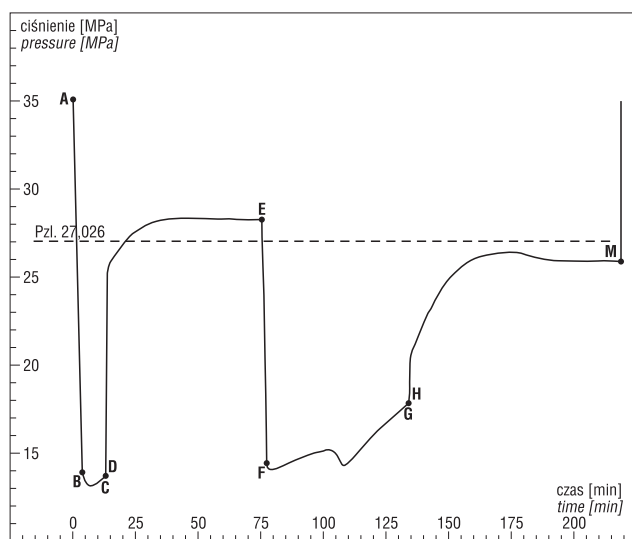
odległość odwiertu S-2K od granicy strefy uskokowej, która wynosi ponad 5 m. Wynik obliczeń jest zbliżony z rezultatem testu produkcyjnego utworów dewonu wykonanego pół roku później w tym samym odwiercie.

ZASTOSOWANIE METODY LOG-LOG

Metoda log log polega na dopasowywaniu wykresów rzeczywistych do wykresów diagnostycznych. Diagnostyczne wykresy zmian przyrostu ciśnienia dennego (Δp) rejestrowane w czasie testu odbudowy oraz pierwszej pochodnej przyrostu ciśnienia dennego w funkcji przyrostu czasu ($\Delta p'$) rozpatruje się w skali podwójnie logarymicznej, przy czym

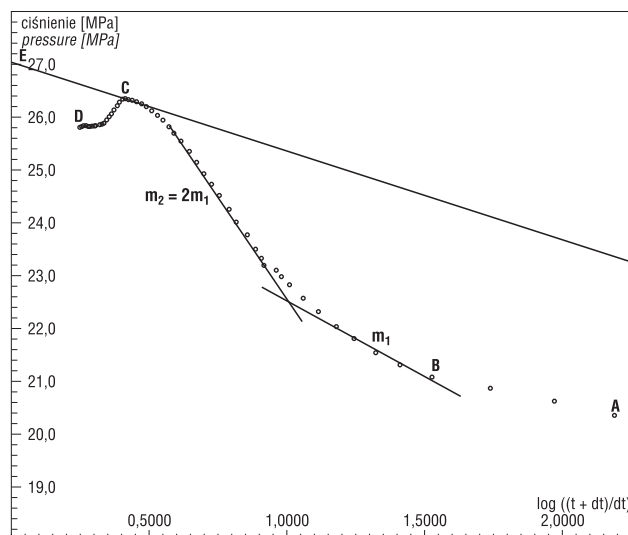
$$\Delta p' = \frac{\partial \Delta p}{\partial \ln \Delta t} = \Delta t \frac{\partial \Delta p}{\partial \Delta t} \quad [1]$$

Wykresy diagnostyczne umożliwiają dobór teoretycznego modelu złoża i identyfikację charakteru przepływu płynu w złożu, przez ich porównanie z wykresami rzeczywistymi. Przez naniesienie tych wykresów w skali podwójnie logarymicznej możliwe jest analizowanie ich charakterystycznego nachylenia względem osi współrzędnych, na podstawie którego można ocenić różne efekty otworowe i złożowe. Dopasowywanie wykresów rzeczywistych do teoretycznych oraz



Ryc. 4. Wykres ciśnienia zarejestrowany przez ciśnieniomierz węglony podczas testu DST nr 8/97 (dewon, 3255–3265 m) w odwiercie S-2K. A–B – zapieczętowanie pakera próbnika złoża; B–C – pierwszy test przepływu (z widoczną początkową iniekcją płuczki wiertniczej do złoża); D–E – pierwszy test odbudowy ciśnienia dennego; E–F – drugie otwarcie zaworu próbnika; F–G – drugi test przepływu (w środkowej części wykresu widoczny efekt samoczynnego wypływu cieczy przybitkowej z kolumny próbnikowej); H–M – drugi test odbudowy ciśnienia dennego (w końcowej części wykresu widoczny spadek ciśnienia na skutek skraplania się węglowodorów wyższego rzędu niż metan) (Dubiel i in., 1993–1998)

Fig. 4. Plot of pressure registered during DST No. 8/97 (Devonian, 3255–3265 m) in S-2K well. Section A–B – corresponds to the packer lock; B–C – first flow test (with visible initial injection of drilling mud to deposit); D–E – first bottom build-up test; E–F – second opening of tester valve; F–G – second flow test (spontaneous outflow of sweep from the tester column in the central part of the plot); H–M – second bottom build-up test (visible drop of pressure in the end part of the plot, caused by condensation of hydrocarbons heavier than methane) (Dubiel et al., 1993–1998)



Ryc. 5. Przykład wyznaczania granicy złoża metodą Hornera na podstawie rezultatów testu DST nr 8/97 (dewon, 3255–3265 m) w odwiercie S-2K: m_1 i m_2 – nachylenie odpowiednio pierwszego i drugiego odcinka wykresu drugiego testu odbudowy ciśnienia dennego ($m_1 = 2 m_2$); A–B – efekt magazynowy odwiertu; C–D – skraplanie cięższych węglowodorów (od C3 do C6); E – ekstrapolacja wartości ciśnienia złożowego; t – czas drugiego testu przepływu; dt – czas drugiego testu odbudowy ciśnienia

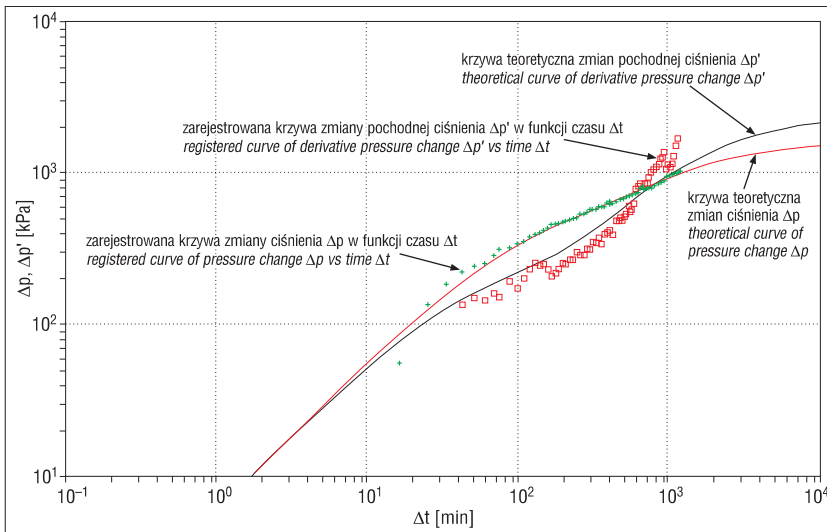
Fig. 5. Exemplary identification of deposit boundaries with the Horner method, based on DST No. 8/97 in S-2K well (Devonian, 3255–3265 m): m_1 and m_2 – tilt of the first and second section of the second bottom build-up test plot ($m_1 = 2 m_2$); A–B – storage effect of well; C–D – condensation of heavier hydrocarbons (from C3 to C6); E – extrapolation of reservoir pressure; t – time of second flow test; dt – time of second build-up test

diagnostykę modelową wykonano przy pomocy komputerowego systemu Saphir (Ehlig-Economides, 1988; Materiały..., 1993–1995; Oprogramowanie..., 1993–1995).

Na złożu Stryżawa testami DST wykonywanymi przez PNiG Kraków, autorzy stwierdzili metodą log-log występowanie w gazonośnych utworach dewonu pojedynczego uskoku stanowiącego nieprzepuszczalną granicę złoża (uszczelniającą lub o stałym ciśnieniu), w odległości około 154 m od odwiertu (tab. 1, ryc. 6). Metodą log-log stwierdzono również występowanie w utworach dewonu strefy dyslokacyjnej, która stanowi granicę w kształcie wieloboku lub koła, w pobliżu trajektorii odwiertu kierunkowego S-2K (tab. 1), zarówno na podstawie rezultatów testu DST nr 8/97 wykonanego przez PNiG Kraków, jak też na podstawie rezultatów testu produkcyjnego wykonywanego w tym odwiercie przez O/KZGNiG Krosno (ryc. 7, tab. 1) (Dubiel i in., 1993–1998). Ponadto, metodą log-log stwierdzono występowanie nieprzepuszczalnej granicy w wodonośnych utworach kambru, prawdopodobnie w postaci uszczelnionego uskoku, w odległości około 152 m od odwiertu S-2K (tab. 1).

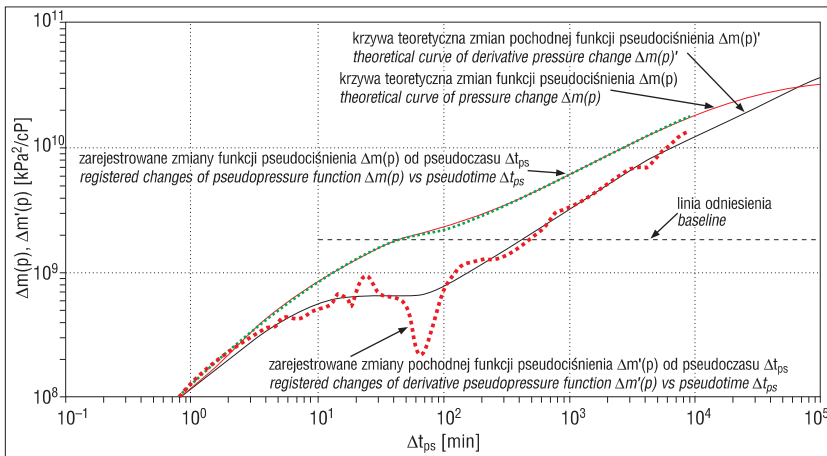
OGRANICZENIA W STOSOWANIU METODY LOG-LOG W UTRUDNIENYCH WARUNKACH TECHNOLOGICZNYCH DOWIERCANIA I OPRÓBOWANIA ZŁOŻA LACHOWICE

Na złożu Lachowice w odwiercie L-4 wykonano cztery testy DST (tab. 1), uzyskując znikome potwierdzenie gazonośności utworów dewonu w postaci śladów gazu ziemnego w powracającej ze złoża płuczce wiertniczej oraz w przybitce wodnej wypełniającej część kolumny próbnikowej. Uzyskane rezultaty tych testów nie nadawały się do interpretacji,



Ryc. 6. Przykład wyznaczania granicy złoża metodą log-log na podstawie rezultatów testu DST nr 32/97 (kambryj, 3286–3292 m) w odwiercie S-2K w przypadku przyływu wody złożowej

Fig. 6. Exemplary identification of deposit boundary with the log-log method based on DST No. 32/97 in S-2K well (Cambrian, 3286–3292 m) in the case of formation water flow



Ryc. 7. Przykład wyznaczania granicy złoża metodą log-log na podstawie rezultatów testu produkcyjnego (dewon, 3263–3272 m) w odwiercie S-2K, wykonanego przez O/GNiG Krosno (Dubiel i in., 1993–1998) w przypadku przyływu gazu ziemnego

Fig. 7. Exemplary identification of deposit boundary with the log-log method based on production test results in S-2K well (Devonian, 3263–3272 m), performed by O/GNiG Krosno (Dubiel et al., 1993–1998), in the case of gas flow

stosowaną już wówczas w PNiG Kraków, metodą log-log głównie z następujących powodów:

- znikomych wartości wyników testu przyływu gazu ziemnego (przyływ gazu z płuczką),
- zbyt krótkiego czasu testu odbudowy (ok. 50% zalecanego),
- małego promienia strefy złoża badanej próbnikiem (kilka metrów), z powodu kolmatacji płuczką strefy przyodwiertowej,
- zbyt dużej wysokości przybitki wodnej wywierającej przeciwcisnienie na złożo wynoszące ponad 25 MPa w początkowym momencie testu przyływu, co sprzyjało skraplaniu się węglowodorów cięższych od metanu (rys. 4), a w wyniku tego zwiększały się opory hydrauliczne przepływu dwufazowego (kondensat–gaz ziemny) do próbnika.

Tymi testami stwierdzono dodatkowo intensywne przemycie strefy przyodwiertowej w pobliżu odwiertu (poprawienie przepuszczalności – ujemny skin-efekt) oraz głębokie zmiany przepuszczalności porowato-szczelinowa-

tych skał zbiornikowych dewonu (w strefie odległej od odwiertu) w wyniku stosowania płuczki wiertniczej o zbyt dużej gęstości (1300 kg/m^3). Zostało ono potwierdzone powracaniem tej płuczki ze złoża do odwiertu podczas czterech testów DST (nr: 2/94; 6/94; 10/94, 16/94).

Test nr 2/94 wykonano w nieorurowanym odcinku odwiertu (3821–3864 m) trzy dni po przewierceniu skał zbiornikowych dewonu. Podczas przewiercania utworów dewonu na tym odcinku stosowano płuczkę polimerową o gęstości ok. 1300 kg/m^3 i filtracji $5 \text{ cm}^3/30 \text{ min}$. Ciśnienie hydrostatyczne tej płuczki w czasie przewiercania wynosiło 49,53 MPa, a represja ciśnienia na złożo – 11,31 MPa.

W wyniku zastosowania przybitki wodnej w kolumnie próbnikowej o znacznej wysokości (2500 m), początkowa depresja ciśnienia na złożo w czasie testu przyływu była mała (12,2 MPa) w porównaniu do podanej wyżej represji ciśnienia. W efekcie, podczas testu przyływu trwającego 73 min, uzyskano słaby dopływ gazu ziemnego z płuczką wiertniczą, ale co ważne – bez obecności wody złożowej. Podczas testu odbudowy trwającego 53 min ciśnienie denne wzrosło do wartości 27,34 MPa (ponad 70% ciśnienia złożowego). Wyniki tego testu nie nadają się do określenia parametrów złożowych, ani też odległości odwiertu L-4 do granicy tej części złoża Lachowice. Mogą one natomiast stanowić podstawę decyzji o konieczności wykonania zabiegu intensyfikacji przyływu, np. przez kwasowanie węglanowych skał zbiornikowych dewonu.

Test nr 6/94 wykonano w nieorurowanym odcinku odwiertu na głębokości 3858–3912 m, jeden dzień po przewierceniu utworów dewonu. Podczas przewiercania skał zbiornikowych stosowano duże ciśnienie hydrostatyczne słupa płuczki na złożo (49,95 MPa) oraz dużą represję ciśnienia (10,28 MPa). Natomiast początkowa depresja ciśnienia na złożo w czasie testu przyływu była mała (13,3 MPa), toteż podczas testu przyływu trwającego 122 min uzyskano słaby przyływ płuczki powracającej ze złoża ze śladami gazu ziemnego (bez obecności wody złożowej). W trakcie 57-minutowego testu odbudowy, ciśnienie denne wzrosło do wartości 37,17 MPa (95% ciśnienia złożowego). Szacunkowymi obliczeniami promienia strefy badania, wynoszącego ok. 4 m, stwierdzono polepszenie przepuszczalności skał zbiornikowych (ujemny skin-efekt) na skutek ich przemycia płuczką podczas przewiercania. Wyniki tego testu (podobnie jak poprzedniego) nie nadają się do określenia parametrów złożowych, ani też odległości odwiertu do granicy tej części złoża, ale mogą stanowić podstawę decyzji o konieczności wykonania kwasowania skał zbiornikowych dewonu.

Test nr 10/94 (3902–3956 m) był wykonany w podobnych warunkach technologicznych jak testy poprzednie. Parametry technologiczne tego testu są następujące:

gęstość płuczki – 1280 kg/m³, filtracja – 6,3 cm³/30 min, ciśnienie hydrostatyczne płuczki – 49,46 MPa, represja ciśnienia płuczki – 9,74 MPa, wysokość słupa przybitki wodnej – 2 500 m, początkowa depresja ciśnienia na złoże – 14,03 MPa. Testem przyływu (ok. 90 min) stwierdzono znikomą wartość przyływu gazu ziemnego rozproszonego w przybitce wodnej. Ciśnienie denne po 92 min odbudowało się do wartości 38,47 MPa (97% ciśnienia złożowego). Na podstawie uzyskanych danych stwierdzono brak możliwości określenia parametrów złożowych i granicy złoża.

Test nr 16/94 na głębokości 3926–4020 m wykonano osiem dni po przewierceniu tego odcinka przy następujących parametrach: gęstość płuczki – 1280 kg/m³, filtracja płuczki – 7 cm³/30 min, ciśnienie hydrostatyczne płuczki – 48,97 MPa, represja ciśnienia płuczki na złoże – 10,17 MPa, wysokość słupa przybitki wodnej – 2600 m, początkowa depresja ciśnienia na złoże – 12,84 MPa. Testem tym (ok. 96 min) stwierdzono znikomą wartość przyływu gazu ziemnego (ok. 15 l/min) z płuczką wiertniczą. Ciśnienie denne odbudowało się w czasie ok. 63 min do wartości 27,66 MPa (71% ciśnienia złożowego). Na podstawie uzyskanych danych stwierdzono brak możliwości określenia parametrów złożowych i granicy złoża.

Należy podkreślić, że przyływ do próbnika gazu ziemnego wraz z powracającą ze złoża płuczką, przy równoczesnym braku przyływu wody złożowej, stanowi podstawę podjęcia decyzji o wykonaniu zabiegu intensyfikacji przyływu gazu ziemnego. Z tego względu uważamy, że odwiertem L-4 nie rozpoznano ani parametrów znacznej części złoża Lachowice, ani też jego granic. Należałoby więc po rekonstrukcji tego odwiertu wykonać zabieg kwasowania lub hydraulicznego szczelinowania węglanowych skał dewonu, albo wykonać nowy odwiert w tej części złoża.

WNIOSKI

1. Zastosowanie rurowych próbników złoża o nowoczesnej konstrukcji oraz użycie odpowiednich metod interpretacji rezultatów testów DST umożliwia znaczne zwiększenie efektywności poszukiwań naftowych, stwierdzenie występowania granic stref akumulacji węglowodorów, a także ułatwia podejmowanie decyzji w zakresie wykonywania zabiegów stymulacji wydobywania węglowodorów.

2. Dzięki uzyskanym результатам testów DST w odwiercie S-2K jest możliwa identyfikacja granicy złoża Stryżawa, również w przypadku ich interpretacji tradycyjną metodą Hornera, prawie nie stosowaną do tego celu w przemyśle. Jednak, jak wykazano w niniejszej publikacji, w przypadku odwiertu S-2K, stosując nowoczesną metodę log-log, można uzyskać dodatkowe informacje dotyczące rodzaju i kształtu granicy złoża w promieniu strefy złoża badanej próbnikiem.

3. Metodą log-log autorzy stwierdzili, że w odległości od kilku do kilkunastu metrów od odwiertu S-2K występuje ograniczenie złoża Stryżawa strefą uskokową w kształcie trójboku, a w odległości około 152 m od tego odwiertu występuje pojedynczy uskok uszczelniający o stałym ciśnieniu. Podobny uskok uszczelniający znajduje się w odległości około 154 m od odwiertu L-7.

4. Analizy rezultatów testów DST pod kątem występowania granic rozpatrywanych złóż gazu ziemnego Lachowice oraz Stryżawa potwierdzają:

- znaczną zbieżność wyników, przedstawionych w publikacji metod identyfikacji granicy złoża Stryżawa;
- występowanie ograniczeń w stosowaniu metody log-log w przypadku złoża Lachowice (odwiert L-4), które wynikają z zastosowania niewłaściwej technologii dowiercania i opróbowania tego złoża (przemycie lub kolmatacja skał zbiornikowych w strefie przyodwiertowej oraz dużych oporów hydraulicznych przepływu dwufazowego do próbnika kondensat–gaz ziemny);
- brak dostatecznego rozpoznania geologicznego znacznej części złoża Lachowice udostępnionej odwiertem L-4, w którym celowe jest wykonanie zabiegu intensyfikacji przyływu gazu ziemnego.

Autorzy niniejszej publikacji składają serdeczne podziękowania Recenzentowi za wnikliwe uwagi merytoryczne, a zwłaszcza za wskazanie słusznych poprawek i uzupełnień oraz redaktorowi Andrzejowi Gąsiewiczowi za pomocne uwagi redakcyjne.

Praca finansowana w ramach badań statutowych (projekt nr 11.11.190.555) Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH.

LITERATURA

- BARAN U., JAWOR E. & JAWOR W. 1997 – Rozpoznanie geologiczne i wyniki prac poszukiwawczych za węglowodorami w zachodniej części polskich Karpat. *Prz. Geol.*, 45 (1): 66–75.
- COMPOSITE CATALOG of Oil Field Equipment and Services. 1986–1987 – World Oil. A Gulf Publishing Company Publication, Houston.
- DUBIEL S., 2011 – Zastosowanie rurowych próbników złoża firmy Halliburton typu Ful-Flo w poszukiwaniach naftowych. *Wiertnictwo, Nafta, Gaz*, 28: 617–628.
- DUBIEL S., RZYCZNIK M., WÓJTOWICZ T. & KUŁAGA T. 1993–1998. Analiza i interpretacja wyników badań rurowymi próbnikami złoża warstw perspektywicznych w rejonie Przedgórze Karpat, w celu oceny właściwości zbiornikowych skał i parametrów złożowych poszczególnych poziomów. Praca naukowo-badawcza. WVNiG – AGH Kraków (praca niepublikowana).
- DUBIEL S., CHRZĄSZCZ W. & RZYCZNIK M. 2003 – Problemy opróbowania warstw perspektywicznych rurowymi próbnikami złoża. *Uczelniane Wyd. Nauk.-Dydak.* AGH, Kraków.
- EHLIG-ECONOMIDES C. 1988 – Use of the Pressure Derivative for Diagnosing Pressure-Transient Behaviour. *J. Petrol. Technol.*, 10: 1280–1282.
- HORNER D.R. 1951 – Pressure build-up in wells. *Third World Cong. Hague*.
- JAWOR E., 1997 – Rozpoznanie geologiczno-złożowe i kierunki dalszych prac w środkowej i zachodniej części Karpat i Zapadliska Przedkarpacciego. *Nafta Gaz*, 3: 95–105.
- MATERIAŁY firmy Kappa 1993–1995 – Oprogramowanie interpretacji testów złożowych francuskiej firmy Kappa. ZPNiG Kraków.
- MATERIAŁY konferencyjne firmy Schlumberger, 1993 – Well test interpretation for monophasic oil and gas by analysis of pressure behavior. 19–20 stycznia 1993, Warszawa.
- OPROGRAMOWANIE interpretacji testów otworowych firmy Kappa, 1993–1995. ZPNiG Kraków.
- ŚWIERCZEWSKA A. 2005 – The interplay of the thermal and structural histories of the Magura Nappe (Outer Carpathians) in Poland and Slovakia. *Mineralogica Polonica*, 36 (2): 91–144.
- ŻYTKO K., ZAJĄC R., GUCIK S., RYŁKO W., OSZCZYPKO N., GARLICKA I., NEMCOK J., ELIAS M., MENCIK E. & STRANIK Z. 1988 – Map of the tectonic elements of the Western Outer Carpathians and their foreland 1:500 000. [W:] Poprawa P., Nemcok J. (red.) *Geological Atlas of the Western Outer Carpathians and their Foreland*, 1989. Państw. Inst. Geol., Warszawa.

Praca wpłynęła do redakcji 12.02.2014 r.
Akceptowano do druku 15.07.2014 r.