

Budowa geologiczna i geneza mioceńskiego zrębu Ryszkowej Woli w rejonie Sieniawy–Rudki (wschodnia część zapadliska przedkarpackiego) — wyniki interpretacji danych sejsmiki 3D

Piotr Krzywiec¹, Paweł Aleksandrowski², Barbara Ryzner-Siupik³, Bartosz Papiernik⁴, Janusz Siupik³, Krzysztof Mastalerz⁵, Anna Wysocka⁶, Jacek Kasiński¹



P. Krzywiec



P. Aleksandrowski



B. Ryzner-Siupik



B. Papiernik



J. Siupik



K. Mastalerz



A. Wysocka



J. Kasiński

Geological structure and origin of the Miocene Ryszkowa Wola Horst (Sieniawa–Rudka area, eastern part of the Carpathian Foredeep Basin) — Results of 3D seismic data interpretation. *Prz. Geol.*, 53: 656–663.

Summary. The Miocene Carpathian Foredeep Basin in Poland (CFB) developed in front of the Outer Carpathian fold-and-thrust belt, at the junction of the East European craton and the Palaeozoic platform. Within the upper Badenian through Sarmatian deposits of its eastern part, the CFB hosts numerous gas fields. The gas-bearing Miocene succession is characterised by a shallowing-upward trend of sedimentation and consists of offshore hemipelagic, turbiditic and deltaic and nearshore-to-estuarine facies associations. The foredeep basin formation was largely controlled by the structure of its Neoproterozoic–Early Cambrian basement, especially by NW–SE trending faults inherited from Mesozoic tectonic history of SE Poland (subsidence and inversion of the Mid-Polish Trough). Several NW–SE-elongated, narrow basement pop-up structures developed in the northeasternmost

part of the CFB, one of them being the Ryszkowa Wola block. The uplift of the pop-up basement block involved Miocene reactivation of older fault zones and resulted in the formation of a narrow, NW–SE elongated Ryszkowa Wola horst (RWH) above it, within the Miocene strata. A complex system of right-stepping, en-echelon, mainly normal faults of predominantly E–W trend, branching off from the NW–SE-striking boundaries of the RWH, has developed around and above the horst, leading to compartmentalisation of the Miocene succession into numerous, mutually displaced and rotated fault blocks. Such an association of deformation structures recognised from the 3D seismics was interpreted in terms of transpressive conditions with the horizontal maximum tectonic compression axis directed \pm E–W and a sinistral strike-slip displacements on NW–SE striking faults in the basement. The structural interpretation of the Ryszkowa Wola structure proposed here is in line with published results of analogue modelling of fault patterns in sediments overlying active strike-slip discontinuities in a rigid basement. The basement-cover interaction within the Ryszkowa Wola structure in the area of Sieniawa–Rudka was partly coeval with the Miocene deposition of the CFB infill. The uplift and horizontal displacements of the Ryszkowa Wola basement block modified the local subsidence pattern and the organisation of Miocene depositional systems. The syn-depositional strike-slip fault activity in the basement of the CFB resulted in differential movements and rotations of kinematically linked fault-blocks in the Miocene succession around and above the RWH, leading to the formation of numerous gas traps.

Key words: Carpathian foredeep, Miocene, strike-slip faults, 3D seismic data, natural gas reservoirs

We wschodniej części zapadliska przedkarpackiego znajduje się struktura zwana zrębem Ryszkowej Woli, której genezę wiązano z mioceńskimi ruchami przesuwczymi (Krzywiec, 1999, 2001). Dzięki uzyskaniu przez PGNiG wysokiej jakości danych sejsmiki 3D w rejonie Sieniawy–Rudki (Filo i in., 2000) możliwe było potwierdzenie i

uszczegółowienie tej hipotezy. Przedstawieniu aktualnego stanu wiedzy na temat budowy i genezy zrębu Ryszkowej Woli na podstawie interpretacji nowych danych sejsmicznych oraz analizy danych otworowych (por. Krzywiec, 2003, 2004a, b; Krzywiec i in., 2001, 2003, 2004; Mastalerz, 2004a,b) poświęcona jest niniejsza praca. Wykazano w niej, iż w rejonie Sieniawy–Rudki wskutek lewoskrętnych przemieszczeń przesuwczych na uskokach o kierunku NW–SE w paleozoicznym podłożu zapadliska, doszło do uniesienia wzdłuż stromych uskoków o składowej odwróconej wydłużonego bloku podłoża tworzącego, tzw. strukturę z wyciśnięcia. Powyżej, w obrębie mioceńskiego nadkładu, wykształcił się nadprzesuwczy układ kulisowych uskoków o kinematyce w przewodzie normalnej i rozciągłości \pm E–W, których wygięte ku położeniu NW–SE segmenty wyznaczają i ograniczają wyniesienie utworów mioceńskich stanowiących zręb Ryszkowej Woli.

Niniejszy artykuł skoncentrowany jest na zagadnieniach tektonicznych, natomiast prezentacja zagadnień

¹Państwowy Instytut Geologiczny, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; Piotr.Krzywiec@pgi.gov.pl

²Instytut Nauk Geologicznych, Uniwersytet Wrocławski, pl. Maksz Borna 9, 50-205 Wrocław;

³PGNiG S.A., PGNiG S.A., ul. Lubicz 25, 31-503 Kraków;

⁴Akademia Górniczo-Hutnicza, Instytut Surowców Energetycznych WGGiOŚ, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

⁵Pracownia Geologiczna „Explora”, ul. Grottera 5, 51-630 Wrocław;

⁶Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa

dotyczących sedymentologii i stratygrafii sekwencyjnej osadów miocénskich będzie tematem osobnego artykułu.

Część zagadnień z zakresu geologii strukturalnej i tektoniki zasymulizowanych poniżej nie było szerzej prezentowanych w polskiej literaturze geologicznej, a co za tym idzie również niektóre wykorzystane terminy, funkcjonujące w angielskojęzycznej literaturze geologicznej, nie mają jeszcze swoich szeroko akceptowanych polskich odpowiedników. Z tego względu w niniejszym tekście podane są terminy zarówno angielskie, jak i polskie. Polskie terminy należy jednak traktować jedynie jako wstępne propozycje, które powinny być przedyskutowane i zaakceptowane przez środowisko polskich tektoników.

Budowa geologiczna wschodniej części zapadliska przedkarpacciego

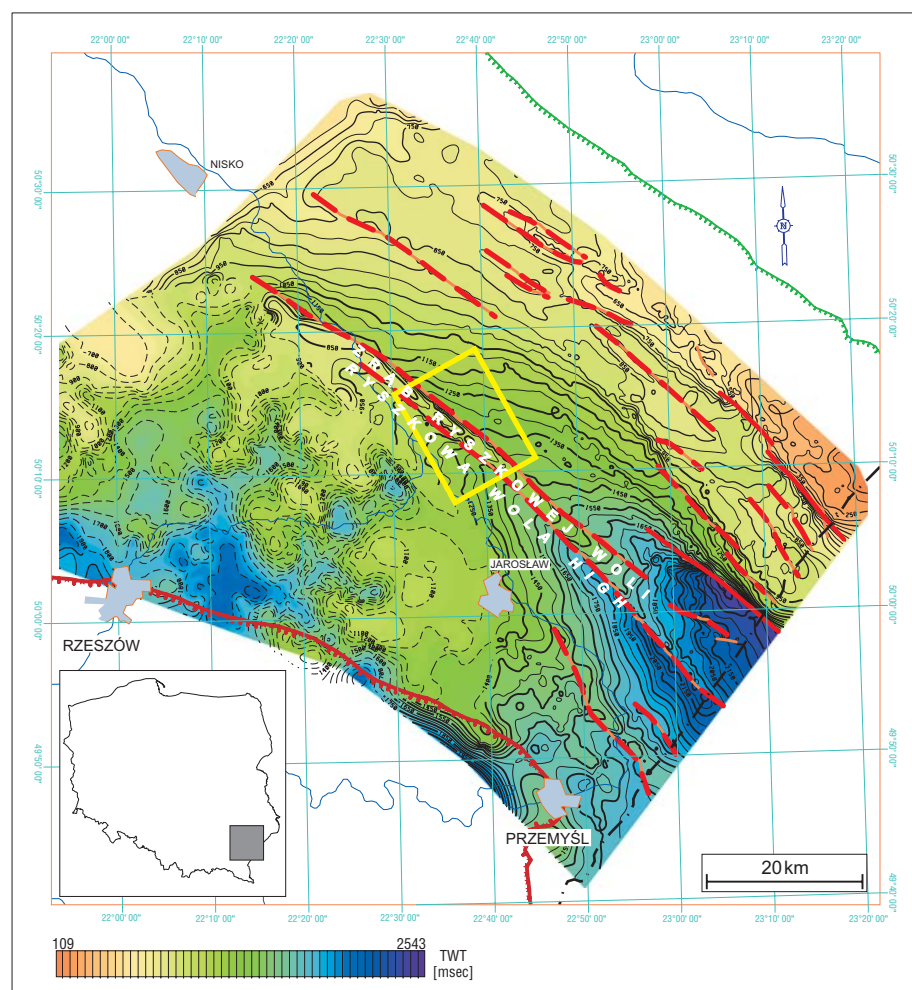
Tektonika. Podłoże wschodniej części zewnętrznej strefy zapadliska przedkarpacciego jest zbudowane głównie ze skał paleozoicznych i neoproterozoicznych bloku małopolskiego (Głowacki i in., 1963; Oszczytko i in., 1989; Dziadzio & Jachowicz, 1996), odsłoniętych spod pokrywy mezozoicznej w wyniku inwersji bruzdy śród-

polskiej na przełomie kredy i paleogenu oraz wypiętrzenia wału metakarpacciego w miocenie. W obrębie zróżnicowanego morfologicznie stropu podłoża zapadliska przedkarpacciego, wyróżniono wiele wyniesionych bloków (zrębów) i obniżień (rowów): blok Cieszanowa, blok Lubaczowa, blok Olszyc, rów Wielkich Oczu, blok („zrąb”) Ryszkowej Woli, blok (zrąb) Przemyśla (Karnkowski, 1974), ograniczonych walnymi strefami uskokoowymi o regionalnym kierunku NW–SE (ryc. 1). Strefy te są reaktywowanymi w miocenie starszymi strukturami, które uprzednio wzięły udział w rozwoju i inwersji najbardziej południowo-wschodniego fragmentu bruzdy śródpolskiej (por. Kutek & Głazek, 1972; Karnkowski, 1974; Pożaryski & Żyto, 1981; Kutek, 1994; Krzywiec, 1999, 2001, 2002).

Dla wschodniej części polskiego fragmentu zapadliska przedkarpacciego zaproponowano wiele modeli wyjaśniających zróżnicowaną morfologię jego podłoża, wiążąc ją zarówno ze zjawiskami tektonicznymi (np. Cisek & Czernicki, 1965; Karnkowski & Głowacki, 1961; Karnkowski, 1974, 1983; Dziadzio & Jachowicz, 1996; Krzywiec & Pietsch, 1996; Moryc, 1961; Ney 1969), jak i erozyjnymi (Jucha, 1974, 1985, 1994). Szczegółowe omówienie tych modeli oraz wielu innych aspektów budowy i ewolucji geologicznej tego fragmentu zapadliska przedkarpacciego można znaleźć w pracach Krzywca (1997; 1999; 2001; 2005), por. również Oszczytko i in., (2005).

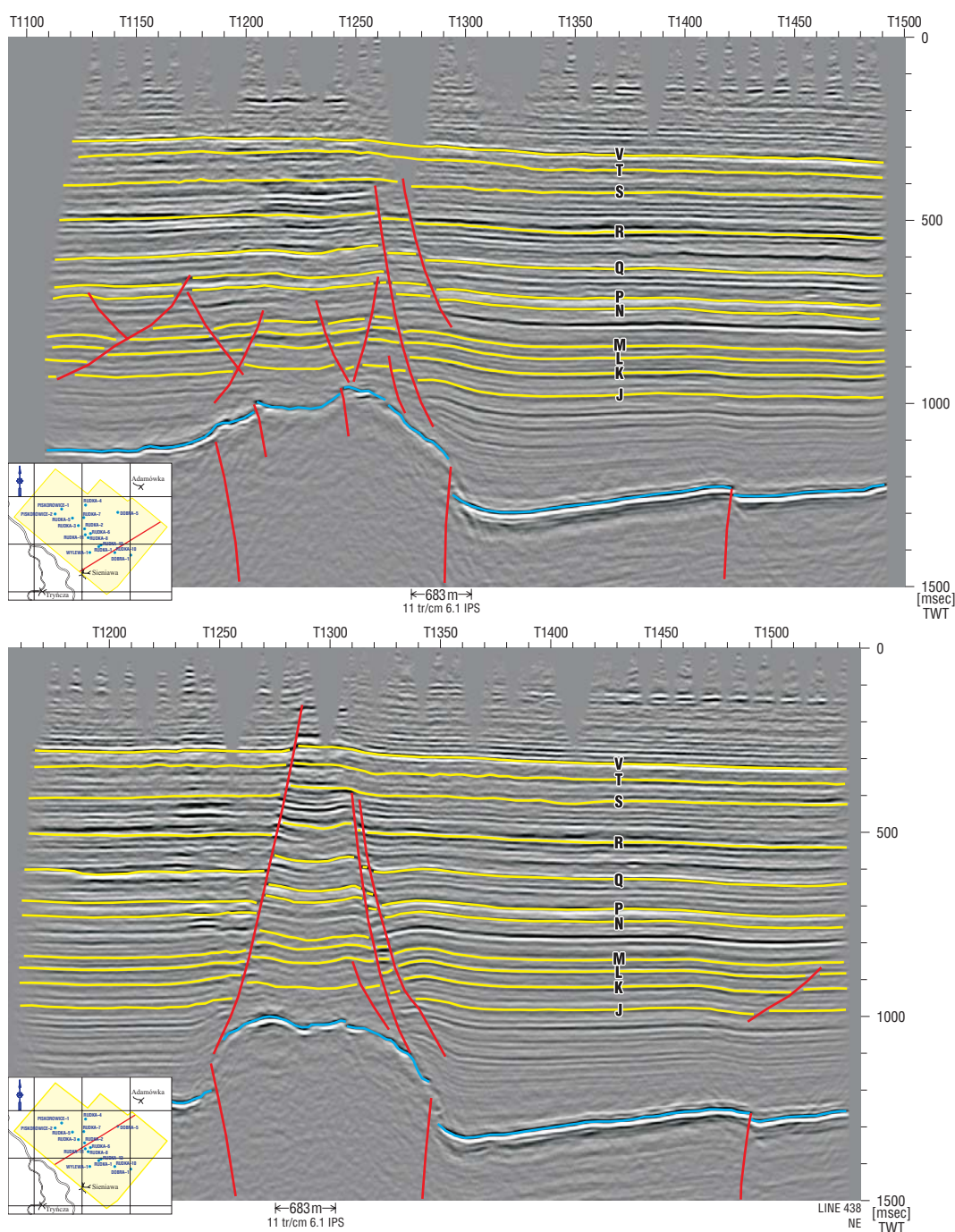
Badeńsko-sarmackie osady wschodniej części zapadliska przedkarpacciego zalegają zazwyczaj spokojnie, poziomo lub z nachyleniem nie przekraczającym kilku stopni, zwiększającym się jedynie w spągowych partiach wypełnienia basenu, gdzie powszechne jest kompacyjne oblekanie nierówności podłoża. Zaburzenia uskokowe w osadach miocenu są zlokalizowane głównie nad wyniesieniami podłoża, poza nimi występują raczej sporadycznie.

Zarys sedymentologii i stratygrafii osadów miocénskich. Ponad kilometrowej miąższości sukcesja osadowa miocenu w NE polskiej części zapadliska przedkarpacciego jest reprezentowana głównie przez słabo skonsolidowane osady silikoklastyczne, cechuje się umiarkowanym zróżnicowaniem facjalnym i wykazuje trójdzielną budowę (m.in. Ney, 1969; Ney i in. 1974; Dziadzio, 2000; Myśliwiec 2004a). Na podstawie analizy litologiczno-sedymentologicznej rdzeniowanych odcinków otworów wiertniczych z obszaru badań zaproponowano wyróżnienie kilku charakterystycznych zespołów facji osadowych, od hemipelagicznych do aluwialnych i piasz-



Ryc. 1. Sejsmiczna mapa badeńskiego poziomu anhydrytowego we wschodniej części zapadliska przedkarpacciego (skala pionowa–milisekundy, czas podwójnego przebiegu). Żółty prostokąt – lokalizacja zdjęcia sejsmicznego 3D „Rudka” ponad zrębem Ryszkowej Woli, czerwone linie–uskoki

Fig. 1. Seismic map of the Badenian evaporitic horizon the E Carpathian Foredeep basin (vertical scale msec, two–way travelttime). Yellow rectangle–3D seismic survey “Rudka” located above the Ryszkowa Wola High, red lines–faults

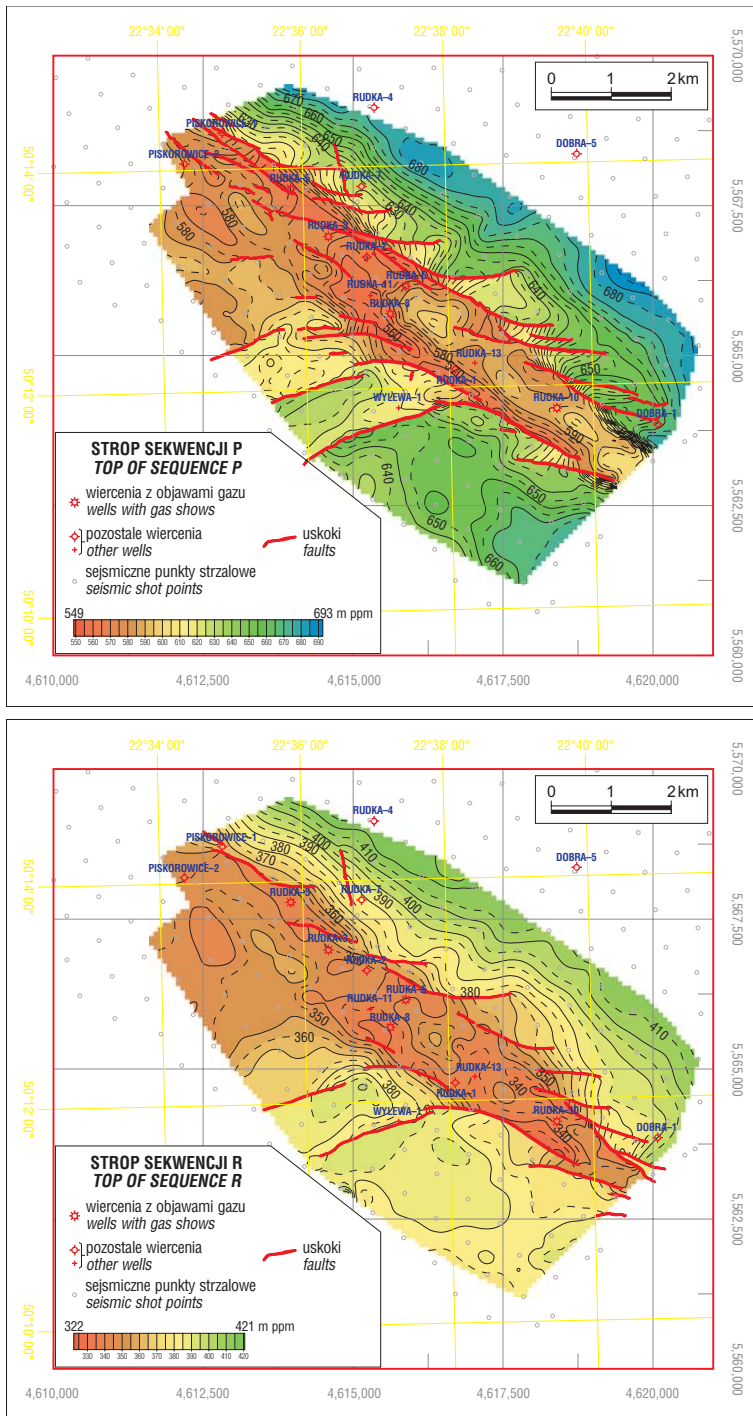


Ryc. 2. Zinterpretowane profile sejsmiczne ze zdjęcia sejsmicznego 3D „Rudka”. Niebieski horyzont: badeńskie ewaporaty, żółte horyzonty (J–V): granice sekwencji depozycyjnych wyznaczonych na podstawie danych otworowych

Fig. 2. Interpreted seismic profiles from the 3D seismic survey “Rudka”. Blue horizon–Badenian evaporites, yellow horizons (J–V): boundaries of depositional sequences distinguished using well data

czystego przybrzeża (Krzywiec i in., 2003, 2004a, b). Dolna granica sukcesji miocenińskiej jest na omawianym obszarze wybitną niezgodnością erozyjną i kątową. Bezpośrednio powyżej występuje niewielkiej miąższości pakiet osadów mających częściowo cechy depozycji w warunkach lądowych oraz w strefie płytkiego, piaszczystego przybrzeża (kompleks podewaporatowy). Powyżej zalega kilkunastometrowej miąższości kompleks ewaporatowy reprezentowany niemal wyłącznie przez anhydryty. Ponad ewaporatami zalega niewielkiej miąższości (15–25 m) pakiet osadów drobnziarnistych, w którego wyższej części pojawiają się coraz liczniejsze turbidyty. Osady te

zapoczątkowują serię silikoklastyczną sarmatu, która osiąga ponad kilometrową miąższość. W skład tej serii wchodzi kilkadziesiąt zróżnicowanych sekwencji osadowych. Powstawały one wskutek akumulacji osadów w formy różnej wielkości, głównie podwodnych nasypów. Cechy facjalne osadów tej serii potwierdzają ogólną tendencję splaniania się basenu w trakcie jej sedimentacji (por. Dziadzio, 1999, 2000; Myśliwiec, 2004a). W stropie utworów miocenińskich występują słabo wysortowane i prawdopodobnie nieskonsolidowane osady klastyczne, reprezentujące zapewne wyłącznie osady środowisk subaeralnych.



Ryc. 3. Głębokościowe mapy strukturalne stropu sekwencji P i R dla osiowej części struktury Ryszkowej Woli w rejonie Sieniawy–Rudki
Fig. 3. Depth structural maps of the tops of the depositional sequences P and R for the axial part of the Ryszkowa Wola structure in the Sieniawa–Rudka area

Szczegółowa analiza danych karotażowych, interpretacja sedimentologiczno-facjalna odcinków rdzeniowych oraz wyniki korelacji międzyotworowej dla obszaru badań, poparte interpretacją wysokiej jakości danych sejsmicznych, umożliwiły dokonanie podziału serii silikoklastycznej sarmatu na sekwencje genetyczne (*sensu* Galloway, 1989). Poszczególne sekwencje ograniczone są w stropie i spągu powierzchniami maksymalnego zatopienia, które manifestują się wieloma objawami typowymi dla stref kondensacji stratygraficznej. Każda z sekwencji obejmuje osady asymetrycznego i zazwyczaj złożonego następstwa.

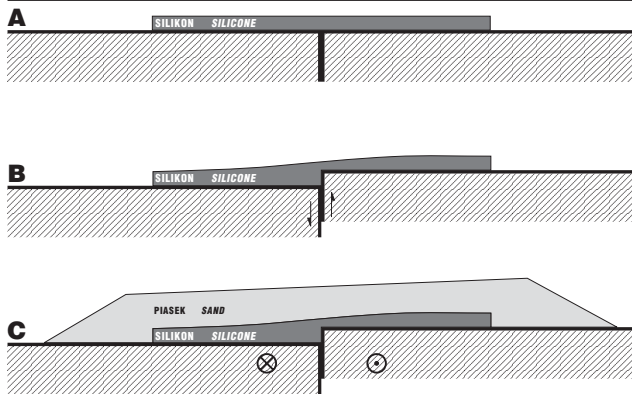
Dolny segment sekwencji (regresywny ciąg systemowy) wykazuje zwykle ogólną tendencję do wzrostu przeciętnej średnicy ziarna oraz grubości ławic ku górze. Tendencja odwrotna jest natomiast obserwowana w górnym, zwykle znacznie cieńszym segmencie sekwencji (transgresywny ciąg systemowy). Wyróżniono 12 sekwencji wysokiej częstotliwości, które zostały potraktowane jako podstawowe jednostki stratygraficzne. Granice sekwencji, wyznaczone na podstawie danych karotażowych, materiał rdzeniowy i korelację międzyotworową, dowiązано następnie do danych sejsmicznych wykorzystując m.in. sejsmogramy syntetyczne.

Interpretacja danych sejsmiki 3D z rejonu Rudki

Metodyka. Wysokiej jakości dane sejsmiki 3D, uzyskane w rejonie Sieniawy–Rudki przez Geofizykę–Kraków na zlecenie PGNiG S.A. (Filo i in., 2000), pozwoliły na weryfikację i istotne uszczegółowienie przesuwczego modelu genezy struktury Ryszkowej Woli w tym rejonie. Dane sejsmiczne zostały skalibrowane w wielu otworach, większość których przewierciła cały kompleks mioceniński i doszła do jego podłoża. W obrębie kompleksu miocenińskiego wykartowano za pomocą danych sejsmicznych 11 granic sejsmicznych skorelowanych z granicami sekwencji omówionymi powyżej (ryc. 2). Interpretacja danych sejsmicznych w obrębie całego bloku danych 3D pozwoliła na skonstruowanie bardzo szczegółowych map strukturalnych dla wszystkich tych granic. Na ryc. 3 pokazane są dwie spośród tych map, skonstruowane dla osiowej części zrębu Ryszkowej Woli i ilustrujące położenie stropu sekwencji depozycyjnych P i R. W obrębie tych sekwencji w otworze Rudka–8 stwierdzono występowanie przemysłowych akumulacji gazu ziemnego.

Do opracowania map strukturalnych (ryc. 3) granic sekwencji zastosowano programy SeisWorks 3D i ZMAP–Plus. Wykorzystana procedura polegała na stopniowym zwiększaniu dokładności siatek interpolacyjnych i interpretacji sejsmicznej. Pierwsze modele obliczano dla wstępnych wyników interpretacji sejsmicznej stosując „zgrubną” trendową siatkę interpolacyjną. Zgodność modeli z tymi wynikami oceniano stosując procedurę *Quality Assurance* (Papiernik in., 2001). Na roboczych mapach identyfikowano rejon występowania istotnych rozbieżności (powyżej 10 m) pomiędzy danymi sejsmicznymi, a modelem trendowym. Rejon te poddawano ponownej interpretacji sejsmicznej.

Na podstawie tak uzyskanych danych skonstruowano mapy wynikowe, stosując modyfikację strategii typu *multi-grid*, automatycznie aplikowanej w algorytmach minimalnej krzywizny (Terzopulos, 1983; Goosie, 1998; Zoraster, 2003). W pierwszej kolejności, na podstawie pełnego zbioru danych wejściowych estymowano siatkę o dużym oczku. Ponownie oceniano jej zgodność z danymi i ustalano położenie stref obarczonych najwyższym błędem



Ryc. 4. Modelowania analogowe deformacji nadprzesuwczych przy obecności warstwy podatnej występującej w spągu wypełnienia osadowego — system laboratoryjny (Richard & Krantz, 1991). A — konfiguracja wyjściowa, B — etap pośredni po ruchach unoszących blok podłoża, przed sedymentacją, C — etap finalny — ruchy przesuwcze, po sedymentacji

Fig. 4. Analogue modelling of the strike-slip related cover deformations with ductile layer at the base of cover sequence—laboratory set-up (Richards & Krantz, 1991). A — initial stage, B — intermediate stage after vertical displacement, before sedimentation of cover sequence, C — final stage—pure strike-slip movements, after sedimentation

(procedura *Quality Assurance*). Dane wykazujące błędy wyższe niż zadane odchyłki progowe odrzucano. Osiągnięta w ten sposób redukcja liczebności danych nie przekraczała 5%, na ogół obejmując ok. 3% danych. Eliminowane punkty stanowiły miejsca lokalnych szumów powstałych w wyniku przeskakiwania w toku interpretacji na sąsiedni refleks, bądź spowodowanymi bezpośrednio bliskością uskoku. Dla wyselekcjonowanych danych liczono następnie modele o gęstym oczku (techniką *Point Gridding Plus*, algorytmem *Least Squares*). Przed ostatecznym konturowaniem, w celu zwiększenia ciągłości izolinii, siatki poddawano ograniczonemu filtrowaniu (*Flexing*). Kluczowe znaczenie dla jakości omawianych map miał sposób uwzględnienia struktur nieciągłych. W toku prac uznano, że najpoprawniejsze modele uzyskuje się wykorzystując poligony uskoku wyinterpretowane w programie *SeisWorks 3D*.

Budowa zrębu Ryszkowej Woli. Jak pokazały wcześniejsze wyniki interpretacji danych sejsmiki 2D z rejonu struktury Ryszkowej Woli, może być ona interpretowana jako produkt przemieszczenia przesuwczego w podłożu (Krzywiec, 1999, 2001). Na podstawie nowych danych sejsmiki 3D, w obrębie przedmiocenińskiego podłoża wyinterpretowano występowanie stromych uskoku o składowej odwróconej, ograniczających wydłużony NW–SE, wyniesiony blok podłoża oraz stromych uskoku normalnych, ograniczających wyniesiony nad wspomniany blokiem zręb osadów miocenu (ryc. 2).

W literaturze anglosaskiej pojęcie „zrębu” odnosi się jedynie do takiego wyniesionego bloku uskoku, który jest ograniczony przez uskoki normalne (np. Dennis, 1967; Ramsay & Huber, 1987; Twiss & Moores, 1992; Hatcher, 1995). Chociaż w polskiej literaturze tego ograniczenia zasadniczo się nie stosuje (por. np. Książkiewicz, 1979; Dadlez & Jaroszewski, 1994), to jednak zmienna w pionie budowa struktury Ryszkowej Woli, zachęca do rozgraniczenia i możliwie precyzyjnego opisu elementów występujących w poszczególnych jej piętrach strukturalnych,

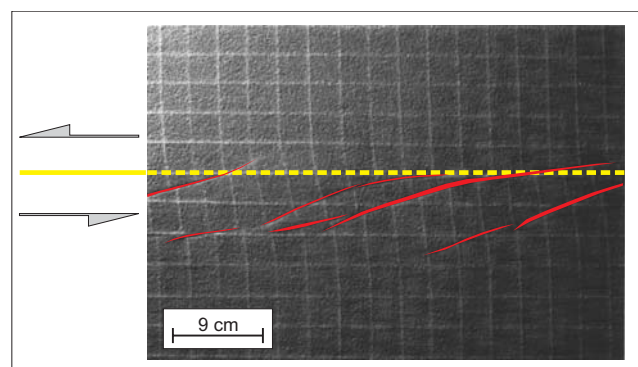
przy użyciu odpowiednich terminów. Dlatego też, zdecydowano się w tej pracy ograniczyć nazwę „zręb” do strukturalnego wyniesienia osadów miocenu, ograniczonego dwoma równoległymi do siebie ciągami uskoku normalnych (ryc. 2, 3), stanowiącymi ukierunkowane NW–SE segmenty krzywoliniowych w planie nadprzesuwczych uskoku kulisowych. Jednocześnie, niżejleżące blokowe wyniesienie podłoża, ograniczone równoległymi do siebie uskoku odwróconymi o kierunku NW–SE (ryc. 1, 2), określono terminem „struktury z wyciśnięcia” (ang. *pop-up structure*). Tego typu wydłużone, wypiętrzone bloki uskoku są, skądinąd, charakterystycznym produktem ubocznym intensywnej tektoniki przesuwczej (Sylvester, 1988). Wspomniany „wyciśnięty” blok podłoża, stanowiący najniższy składnik struktury Ryszkowej Woli, można też, zgodnie z poprzednią interpretacją Krzywca (1999) traktować jako element pozytywnej struktury kwiatowej występujący w obrębie przedmiocenińskiego podłoża.

Drugim elementem struktury Ryszkowej Woli jest zręb w osadach miocenu ograniczony systemem uskoku normalnych, przechodzącym obocznie w skośne do zrębu uskoku kulisowe, umiejscowione ponad uniesionym blokiem podłoża.

Trzeci element struktury Ryszkowej Woli stanowią struktury nadprzesuwcze w otoczeniu i nadkładzie zrębu Ryszkowej Woli (ryc. 2, 3) w postaci dwóch kulisowych zespołów uskoku (w przewodzie) normalnych, towarzyszących od strony zewnętrznej obu brzeżnym systemom uskoku zrębu, swym położeniem jednoznacznie wskazującym na lewoskrętną kinematykę przemieszczeń podłoża. Oba zespoły kulisowych uskoku występujących w obrębie utworów miocenijskich obok i ponad zrębem Ryszkowej Woli można traktować też jako dwie równoległe, lewoprusuwcze, kruche strefy ścinania (np. Ramsay & Huber, 1987).

Interpretacja danych sejsmiki 3D wykazała, że struktura Ryszkowej Woli ma w rejonie Sieniawy–Rudki dość skomplikowaną, zmieniającą się w pionie strukturę blokową, którą można rozpatrywać w kategoriach trzech pięter strukturalnych (ryc. 2, 3):

1) wyniesionego bloku podłoża wyciśniętego ku górze wzdłuż dwóch stromych uskoku brzeżnych o biegu NW–SE i składowej odwróconej,



Ryc. 5. Wyniki modelowań analogowych deformacji nadprzesuwczych — fotografia górnej powierzchni „warstwy osadowej” po ruchach przesuwczych w obrębie podłoża wzdłuż pionowego uskoku przesuwczego (z Richard & Krantz, 1991, zmodyfikowane)

Fig. 5. Results of analogue modelling of the strike-slip-related cover deformations — photograph of top surface of the cover sequence after strike-slip reactivation of vertical basement fault (from Richards & Krantz, 1991, modified)

2) nadścielającego ten blok zrębu wyciętego w osadach miocenu przez systemy stromych uskoków o istotnej składowej normalnej, wykazujące rozciągłość NW–SE oraz

3) struktur nadprzesuwczych.

Znaczna część uskoków tnących utwory miocenne ma geometrię listryczną; żaden z tych uskoków nie przedłuża się w obręb podłoża podmiocennego (ryc. 2). Można w związku z tym stwierdzić, że w rejonie Rudki mamy do czynienia z rozdzieleniem deformacji (ang. *strain partitioning*) i autonomicznym wykształceniem struktur tektonicznych w podłożu zapadliska oraz w obrębie miocennej pokrywy osadowej.

Analiza opracowanych na podstawie sejsmiki 3D map strukturalnych pokazuje, iż obraz strukturalny zrębu Ryszkowej Woli jest o wiele bardziej złożony od modeli prezentowanych w innych dotychczasowych opracowaniach (np. Krzywiec, 1999, 2001; Filo i in., 2000; por. też Myśliwiec i in., 2004). W obrębie obu stosunkowo szerokich stref uskoków kulisowych występujących w utworach miocennych są zlokalizowane liczne rampy międzyuskokowe, związane z zachodzącymi na siebie w planie poszczególnymi segmentami uskoków. W literaturze angielskojęzycznej obszary takiego transferu przemieszczenia uskokowego pomiędzy sąsiadującymi obocznie uskokami ujętymi w szeregi kulisowe, są nazywane (w wolnym tłumaczeniu) „rampami sztafetowymi” (ang. *relay ramps* — Peacock & Sanderson, 1995), „mostkami” (ang. *bridges*; Gamond, 1987; Ramsay & Huber, 1987) bądź „(strefami) przekroczenia” (ang. *steppovers*; Aydin & Nur, 1985). Rampy te można traktować jako wzajemnie zrotowane i/lub przemieszczone bloki uskokowe.

Dyskusja i wnioski

Wyjaśnienia genezy deformacji tektonicznych zidentyfikowanych w rejonie Rudki dostarcza model zakładający występowanie lewoskrętnej przesuwczności wzdłuż kierunku NW–SE w podłożu, prowadzącej do pionowego wyciśnięcia bloku podłoża, uniesienia nad nim zrębu Ryszkowej Woli w obrębie osadów miocenu, połączonego z powstaniem w tych osadach układu kulisowych uskoków nadprzesuwczych.

Wyniesiony blok podłoża w obrębie struktury Ryszkowej Woli jest przykryty ewaporatami o miąższości analogicznej jak w jego bezpośrednim otoczeniu (poza zrębem), co oznacza, iż podczas sedymentacji ewaporatów (późny baden — por. wyżej) blok jeszcze nie był wyniesiony. W spągowej części miocennych utworów nadewaporatowych (interwał zawarty między ewaporatami a stropem sekwencji J (ryc. 2) obserwuje się istotną redukcję miąższości ponad samym blokiem podłoża, związaną z kontaktami typu bocznych wyklinowań, co wskazuje na wnoszenie bloku wkrótce po depozycji ewaporatów, być może częściowo jeszcze w trakcie depozycji sekwencji J. W obrębie osadowych sekwencji K–V i młodszych obserwujemy tylko lokalne zmiany miąższości w obrębie ramp międzyuskokowych. Maksimum aktywności rozwoju uskoków w osadach miocennych przypada na końcowe etapy depozycji utworów nadewaporatowych i wiąże się z istotną, lewoskrętną przesuwcznością wzdłuż stromych uskoków ograniczających wyciśnięty blok podłoża podmiocennego.

Zrąb Ryszkowej Woli wraz z wyniesionym blokiem podłoża i uskokami towarzyszącymi stanowi doskonały

przykład asocjacji struktur przesuwczych i nadprzesuwczych, w której przemieszczenia (w przewadze) przesuwcze skoncentrowały się w obrębie sztywnego podłoża, deformacje tektoniczne zaś w obrębie słabo zlyfikowanego, miocennego wypełnienia osadowego zapadliska przedkarpacciego są wtórnymi deformacjami towarzyszącymi nadprzesuwczym, co odzwierciedla kontrast litologiczno-reologiczny pomiędzy dwoma piętrami strukturalnymi (por. Schlische i in., 2001). Dodatkowym elementem, istotnym dla wyjaśnienia genezy miocennych deformacji nadprzesuwczych jest fakt występowania w partii spągowej serii miocennych poziomu ewaporatowego ułatwiającego mechaniczne odspojenie między podłożem a nadewaporatowymi skałami nadkładu (por. Withjack & Callaway, 2000; Schlische i in., 2001).

Obserwowane w rejonie Sieniawy–Rudki stosunki strukturalne znajdują swoje odpowiedniki w wynikach modelowań analogowych wpływu przemieszczeń przesuwczych w podłożu na odkształcenia w pokrywie osadowej. W ostatnich latach opublikowano wiele prac dotyczących tego typu modelowań, w różnym stopniu odpowiadających sytuacji geologicznej opisanej dla struktury Ryszkowej Woli. Część tych modelowań dotyczy „czystego” scenariusza przesuwczego, w którym poruszające się względem siebie bloki podłoża podlegały przesunięciu jedynie w poziomie, bez składowej pionowej (Schellart & Nieuwland, 2003; Schreurs, 2003), część natomiast uwzględnia składową pionową uskoków przesuwczych podłoża. Schlische i in. (2001) zaprezentowali wyniki modelowań analogowych struktur nadprzesuwczych rozwiniętych w reżimie transtensyjnym nad uskokiem zrzutowo–przesuwczym. Ponad uskokiem otrzymali oni strefę kulisowo rozmieszczonych uskoków pierzastych. Pomiędzy tymi uskokami rozwijają się skomplikowane rampy międzyuskokowe. Mimo, iż modelowania powyższe odnoszą się do odmiennego typu przesuwczności w podłożu (w reżimie transtensyjnym), niż zakłada postulowany w tej pracy model tektoniczny dla zrębu Ryszkowej Woli (transpresja), ich wyniki pokazują, że ponad strefami przesuwczymi tworzą się strefy uskoków kulisowych, analogicznych do stref opisanych z nadkładu zrębu Ryszkowej Woli. Najlepszym modelowym analogiem dla tego zrębu są wyniki eksperymentów opublikowane przez Richarda i Krantza (1991), w których w spągu nadkładu osadowego umieszczono warstwę silikonu, symulującą podatne utwory typu ewaporatów (ryc. 4), które mogą być traktowane jako ekwiwalent badeńskich ewaporatów w obrębie struktury Ryszkowej Woli. W efekcie rozwoju uskoków odwróconego i jego reaktywacji jako uskoków przesuwczych w obrębie pokrywy osadowej występującej ponad symulowanymi przez warstwę silikonu ewaporatami utworzył się system uskoków pierzastych (ryc. 5), analogicznych do uskoków obserwowanych w obrębie miocennej pokrywy osadowej w obrębie struktury Ryszkowej Woli (por. ryc. 3).

Analiza skonstruowanych na podstawie sejsmiki 3D map strukturalnych sugeruje, iż przesuwcza reaktywacja stromych uskoków podłoża, wykazujących istotną składową odwróconą i ograniczających blok z pionowego wyciśnięcia podłoża, podścielający zrąb Ryszkowej Woli, odbyła się w lewoskrętnym reżimie transpresyjnym, tj. w innych warunkach, niż to postulowano wcześniej w oparciu o dane sejsmiki 2D i rozważania regionalne (Krzywiec, 1999). Wiarygodne określenie kierunku i zwrotu przemieszczeń uskokowych możliwe było dzięki precyzyjne-

mu przestrzennemu zobrazowaniu na zdjęciu sejsmicznym 3D geometrii mioceńskich deformacji nadprzesuwczych. Przesuwczość prawoskrętna postulowana poprzednio, wyinterpretowana została na podstawie obrazu zrębu Ryszkowej Woli, wiodącym na profilach sejsmiki 2D, oraz kontekstu regionalnego: założono, iż przesuwczość wzdłuż zrębu Ryszkowej Woli była efektem kompresyjnego pola naprężeń, generowanego przez mioceńską kolizję zachodzącą wzdłuż orogenu karpackiego i oddziałującego na starsze uskoki występujące w obrębie płyty przedpola (Krzywiec, 1999 — ryc. 25). Przesuwczość lewoskrętna, jednoznacznie wynikająca z interpretacji danych sejsmiki 3D, wymaga zmodyfikowanego modelu regionalnego pola naprężeń, którego opracowanie możliwe będzie jednak dopiero po przeanalizowaniu uzyskanych wyników w bardziej regionalnym kontekście, z wykorzystaniem szczegółowych danych pochodzących z innych części zapadliska przedkarpackiego.

Wyinterpretowany na podstawie danych sejsmiki 3D model lewoskrętnej tektoniki przesuwczej wzdłuż kierunku NW–SE w podłożu zapadliska przedkarpackiego w okolicach Rudki–Sieniawy, znajduje dobitne potwierdzenie w obserwacjach powierzchniowych w wyrobisku czynnej cegielni w Wylewie k. Sieniawy, położonej nad SW uskokiem zrębu Ryszkowej Woli (Krzywiec i in., 2004a, b). W łańcuchach krakowieckich sarmatu stwierdzono tam występowanie intensywnych deformacji tektonicznych w postaci fałdów o osiach od NNW–SSE do N–S, uskoków przesuwczych i zrzutowych różnej skali wielkości, ciosu oraz kliważu ołówkowego. Ten układ struktur jest łatwo interpretowalny w kategoriach struktur nadprzesuwczych, utworzonych w warunkach transpresji o osi poziomej kompresji E–W i lewoskrętnego przesuwu w podłożu, wzdłuż uskoków skierowanych NW–SE. Sugestie co do mioceńskich ruchów przesuwczych oparte na danych terenowych były formułowane w odniesieniu do różnych części zapadliska przedkarpackiego również przez innych autorów (np. Dobrowolski, 1995; Jarosiński, 1992; Jaroszewski, 1972).

Wyniki interpretacji danych sejsmiki 3D z rejonu Sieniawy–Rudki mają istotne znaczenie dla poszukiwań złóż gazu ziemnego, prowadzonych na obszarze zapadliska przedkarpackiego od dziesięcioleci (por. Karnkowski, 1993; Myśliwiec, 2004b). W obrębie ramp międzyuskokowych w rejonie badań stwierdzono lokalne wzrosty miąższości utworów mioceńskich (Krzywiec, 2004a, b). Wzrosty te mogą być efektem mioceńskiej syntektonicznej sedymentacji, lokalnie modyfikowanej przez uskoki nadprzesuwcze powstałe ponad zrębem Ryszkowej Woli. Szczegółowe modele syn-tektonicznej sedymentacji w obrębie ramp międzyuskokowych, opracowane dla obszarów zdominowanych przez uskoki normalne (np. Trudgill, 2002), wykazują, że w strefach ramp, pomiędzy terminalnymi segmentami kolejnych aktywnych uskoków normalnych, często dochodzi do koncentracji facji grubookruchowych, stanowiących perspektywiczne horyzonty zbiornikowe. Szczegółowe rozpoznanie geometrii układów uskoków nadprzesuwczych, związanych z nimi zrotowanych bloków uskokowych w strefach ramp międzyuskokowych i stowarzyszonej lokalnej sedymentacji syntektonicznej powinno pozwolić na identyfikację dodatkowych miejsc akumulacji gazu ziemnego w obrębie całej struktury Ryszkowej Woli oraz podobnych struktur występujących na obszarze wschodniej części zapadliska przedkarpackiego.

Prace badawcze nad budową i ewolucją geologiczną zrębu Ryszkowej Woli zostały sfinansowane przez PGNiG S.A. oraz przez Komitet Badań Naukowych w ramach badań statutowych PIG (temat 6.20.1439.00.0). Piotr Krzywiec dziękuje prof. J. Cartwrightowi i dr R. Daviesowi (obaj 3D Seismic Lab, Cardiff University, Wielka Brytania) za cenne komentarze dotyczące wybranych elementów interpretacji danych sejsmiki 3D.

Literatura

- AYDIN A. & NUR A. 1985 — The types and role of stepovers in strike-slip tectonics. [W:] Biddle K. & Christie-Blick N. (red.) — Strike-slip deformation, basin formation and sedimentation. SEPM Sp. Publ., 37: 35–44.
- CISEK B. & CZERNICKI J. 1965 — Dyslokacje w miocenie autochtonicznym przedgórza Karpat środkowych. Geofizyka i Geologia Naftowa, 7–9 (103–105): 247–251.
- DADLEZ R. & JAROSZEWSKI W. 1994 — Tektonika. Wyd. Nauk. PWN.
- DENNIS J.G. 1967 — International Tectonic Dictionary, English terminology. Intern. Geol. Congress, Memoir 7, Commission for the Geological Map of the World, AAPG, Tulsa: 1–288.
- DOBROWOLSKI R. 1995 — Drobne struktury tektoniczne w skałach górnekredowych wschodniej części Wyżyny Lubelskiej a dyslokacje podłoża platformy wschodnioeuropejskiej w kenozoiku. Ann. Soc. Geol. Pol., 65: 79–91.
- DZIADZIO P. & JACHOWICZ M. 1996 — Budowa podłoża utworów miocenu na SW od wyniesienia Lubaczowa. Prz. Geol., 44: 1124–1130.
- FILIO M., KACHLIK A. & SKOWRON E. 2000 — Dokumentacja wynikowa badań sejsmicznych 3D temat: Rudka. Arch. PGNiG S.A. (niepublikowany raport).
- GALLOWAY W. 1989 — Genetic stratigraphic sequences in basin analysis I: architecture and genesis of flooding-surface bounded depositional units. AAPG Bull., 73: 125–142.
- GAMOND J.F. 1987 — Bridge structures as sense of displacement criteria in brittle fault zones. J. Structural Geol., 9: 609–620.
- GŁOWACKI E., KARNKOWSKI P. & ŻAK C., 1963 — Prekambr i kambr w podłożu przedgórza Karpat środkowych i w Górach Świętokrzyskich. Roczn. Pol. Tow. Geol., 33: 321–338.
- GOOSIE M. B. 1998 — Contours to Digital Elevation Models: Grid Based Surface Reconstruction Methods. PhD Thesis. Dept of Computer Science. Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY: 12180–3590.
- HATCHER R.D. 1995 — Structural Geology: Principles, Concepts and Problems. 2nd Ed., Prentice–Hall, Englewood Cliffs.
- JAROSIŃSKI M. 1992 — Tektonika ilastych skał nadkładu złoża siarki w Machowie k. Tarnobrzegu w świetle analizy mezostrukturalnej. Kwart. Geol., 36: 121–150.
- JAROSZEWSKI W. 1977 — Sedymentacyjne przejawy mioceńskiej ruchliwości tektonicznej na Roztoczu środkowym. Prz. Geol., 26: 418–427.
- JUCHA S. 1974 — Ułożenie przestrzenne i rozwój facjalny miocenu autochtonicznego oraz jego stosunek do nasunięcia karpacko-stebnickiego. Geologia. Z. Nauk. AGH, 22: 9–20.
- JUCHA S. 1985 — New features of structure of the Carpathian Foredeep and basement of the Carpathian Mts. Prz. Geol., 33: 333–344.
- JUCHA S. 1995 — Znaczenie powierzchni niezgodności kątowej na przykładzie profilu zapadliska przedkarpackiego i możliwość przeniesienia zdobytych doświadczeń na formacje geologiczne innych regionów geologicznych w Polsce. [W:] Jucha S. (red.) — Materiały wystawy polskiej cyfrowej kartografii naftowej z okazji konferencji „Modern Exploration and Improved Oil and Gas Recovery Methods” Geologia Naftowa Polski, Kraków 12–15 września, 1995: 20–25.
- KARNKOWSKI P. 1974 — Zapadlisko przedkarpackie — Cześć wschodnia (na wschód od Krakowa). [W:] Pożaryski (red.) — Budowa Geologiczna Polski, t. IV, Tektonika, cz. 1, Niż Polski. Wyd. Geol.: 402–416.
- KARNKOWSKI P. 1983 — Główne fazy orogeniczne przedgórza Karpat. Prz. Geol., 31: 629–632.
- KARNKOWSKI P. 1993 — Złoża gazu ziemnego i ropy naftowej w Polsce. t. II, Karpaty i zapadlisko przedkarpackie. Tow. Geosynoptyków GEOS (AGH).
- KARNKOWSKI P. & GŁOWACKI E. 1961 — O budowie geologicznej utworów podmioceńskich przedgórza Karpat środkowych. Kwart. Geol., 5: 372–419.
- KSIĄŻKIEWICZ M. 1979 — Geologia Dynamiczna. Wyd. Geol.

- KRZYWIEC P. 1997 — Large-scale tectono-sedimentary Middle Miocene history of the central and eastern Polish Carpathian Foredeep Basin — results of seismic data interpretation. *Prz. Geol.*, 45: 1039–1053.
- KRZYWIEC P. 1999 — Mioceńska ewolucja tektoniczna wschodniej części zapadliska przedkarpacciego (Przemysł–Lubaczów) w świetle interpretacji danych sejsmicznych. *Pr. Państw. Inst. Geol.*, 168: 249–276.
- KRZYWIEC P. 2001 — Contrasting tectonic and sedimentary history of the central and eastern parts of the Polish Carpathian Foredeep Basin — results of seismic data interpretation. *Marine & Petroleum Geology*, 18: 13–38.
- KRZYWIEC P. 2002 — Mid-Polish Trough inversion — seismic examples, main mechanisms and its relationship to the Alpine–Carpathian collision. [W:] G. Bertotti, K. Schulmann & S. Cloetingh (ed.), *Continental Collision and the Tectonosedimentary Evolution of Forelands*. European Geosciences Union Stephan Mueller Special Publication Series, 1: 151–165.
- KRZYWIEC P. & PIETSCH K. 1996 — Zmienność stylu tektonicznego i warunków sedymentacji na obszarze zapadliska przedkarpacciego między Krakowem a Przemysłem w świetle interpretacji regionalnych profili sejsmicznych. *Geologia (Kwartalnik AGH)*, 22: 49–59.
- KRZYWIEC P., SIUPIK-RYZNER B. & SIUPIK J. 2001 — Strike-slip movements, extension and syn-tectonic sedimentation — comparison of 2D and 3D seismic data from the E Polish Carpathian foredeep basin (Miocene). *Materiały konferencyjne konferencji „3D Seismic: Advances in the Understanding of Stratigraphic and Structural Architecture and Impact on Field Development”*, Londyn, 14–16.01.
- KRZYWIEC P., KASIŃSKI J., MASTALERZ K., ALEKSANDROWSKI P., WYSOCKA A., JÓŹWIĄK W., WRONICZ S., WRÓBEL G. & PAPIERNIK B. 2003 — Zrąb Ryszkowej Woli (rejon Rudki) — przestronna analiza tektoniczno-sedymentacyjna oraz złożowa — sprawozdanie (2 etap badań). *Archiwum PGNiG S.A.* (niepublikowany raport).
- KRZYWIEC P., RYZNER-SIUPIK B., SIUPIK J. & BORYS Z. 2003 — Miocene Reactivation of the Inherited Foreland Fault Zones and Its Influence on Development of the E Polish Carpathian Foredeep Basin. *Proceedings of the 8th Meeting of the Czech Tectonic Studies Group/ 1st Meeting of the Central European Tectonics Group*, 24–27.04, Hrubá Skála, *Geolines—Papers in Earth Science*, 16: 63–64.
- KRZYWIEC P., RYZNER-SIUPIK B. & SIUPIK J. 2003 — Extension, Inversion, Strike-Slip Movements And Syn-Tectonic Sedimentation Within The Miocene Carpathian Foredeep (SE Poland) — 3D Seismic Imaging Of Complex Tectonosedimentary System. *AAPG International Conference, Barcelona, Hiszpania*, 21–24.09.
- KRZYWIEC P., NESCIERUK P., WÓJCIK A., MALATA T. WRÓBEL G., KASIŃSKI J., PAPIERNIK B., ALEKSANDROWSKI P. & WYSOCKA A. 2004a — Zrąb Ryszkowej Woli (rejon Rudki) — przestronna analiza tektoniczno-sedymentacyjna oraz złożowa — sprawozdanie (3 etap badań). *Archiwum PGNiG S.A.* (niepublikowany raport).
- KRZYWIEC P., NESCIERUK P., WÓJCIK A., MALATA T. WRÓBEL G., KASIŃSKI J., PAPIERNIK B., ALEKSANDROWSKI P. & WYSOCKA A. 2004b — Tektoniczno-stratygraficzny model mioceńskiej ewolucji struktury Ryszkowej Woli w oparciu o interpretację danych sejsmiki 3D. *Centralne Archiwum Geologiczne, Warszawa, opracowanie nr 6.20.1439.00.0*.
- KRZYWIEC P., ALEKSANDROWSKI P., RYZNER-SIUPIK B., PAPIERNIK B., SIUPIK J., MASTALERZ K., WYSOCKA A. & KASINSKI J. 2004 — Miocene tectono-sedimentary evolution of the gas-bearing Ryszkowa Wola high (Rudka area, Carpathian foredeep, SE Poland) — results of 3D seismic, core and well-log interpretation. *AAPG European Region Conference, Praga, Czechy*, 10–13.10: 87–88.
- KUTEK J. 1994 — Jurassic tectonic events in south-eastern cratonic Poland. *Acta Geol. Pol.*, 44: 167–221.
- KUTEK J. & GŁĄZEK J. 1972 — The Holy Cross area, Central Poland, in the Alpine cycle. *Acta Geol. Pol.*, 22: 604–653.
- MASTALERZ K., WYSOCKA A., KASIŃSKI J., PAPIERNIK B., KRZYWIEC P., RYZNER-SIUPIK B., ALEKSANDROWSKI P. & SIUPIK J. 2004a — Środowiska depozycji i stratygrafia sekwencji utworów mioceńskich w rejonie zrębu Ryszkowej Woli (zapadlisko przedkarpaccie). *Materiały konferencji „Polska Konferencja Sedymentologiczna — VIII Krajowe Spotkania Sedymentologów”*, 21–24.06, 108.
- MASTALERZ K., WYSOCKA A., KASIŃSKI J., PAPIERNIK B., KRZYWIEC P., RYZNER-SIUPIK B., ALEKSANDROWSKI P. & SIUPIK J. 2004a — Miocene succession of the Ryszkowa Wola High area (Polish Carpathian foredeep basin, SE Poland): facies, sequence stratigraphy and basin architecture 2004, *AAPG European Region Conference, Praga, Czechy*, 10–13.10, 93.
- MORYC W. 1961 — Budowa geologiczna rejonu Lubaczowa. *Rocznik Pol. Tow. Geol.*, 31: 47–83.
- MYŚLIWIEC M. 2004a — Mioceńskie skały zbiornikowe zapadliska przedkarpacciego. *Prz. Geol.*, 52: 581–592.
- MYŚLIWIEC M. 2004b — Typy pułapek gazu ziemnego i strefowość występowania ich złóż w osadach miocenu wschodniej części zapadliska przedkarpacciego. *Prz. Geol.*, 52: 657–664.
- MYŚLIWIEC M., PLEZIA B. & ŚWIĘTNICKA G. 2004 — Nowe odkrycia gazu ziemnego w osadach miocenu północno-wschodniej części zapadliska przedkarpacciego na podstawie interpretacji bezpośredniego wpływu nasycenia węglowodorami na zapis sejsmiczny. *Prz. Geol.*, 52: 395–402.
- NEY R. 1969 — Miocen południowego Rostocza między Horyńcem a Łowczą i przyległego obszaru zapadliska przedkarpacciego. *Pr. Geol. PAN*, 60.
- OSZCZYPKO N., ZAJĄC R., GARLICKA I., MENCIK E., DVORAK J. & MATEJOVSKA O. 1989 — Geological Map of the Substratum of the Tertiary of the Western Outer Carpathians and Their Foreland. [W:] *Poprawa D. & Nemcok J. (red.) — Geological Atlas of the Western Outer Carpathians and Their Foreland*. Państw. Instyt. Geol., Warszawa.
- OSZCZYPKO N., KRZYWIEC P., POPADYUK I. & PERYT T. 2005 — Carpathian Foredeep Basin (Poland and Ukraine) — its sedimentary, structural and geodynamic evolution. [W:] *Picha F. & Golonka J. (red.) — The Carpathians and Their Foreland: Geology and Hydrocarbon Resources*, AAPG Memoir 84 (w druku).
- PAPIERNIK B., GŁADZIK J. & KRZYWIEC P. 2001 — Zastosowanie procedury Mistie Reduction do oceny i poprawy jakości danych używanych do konstruowania map sejsmicznych. *Prz. Geol.*, 49: 456.
- PEACOCK D.C.P. & SANDERSON D.J. 1994 — Geometry and Development of Relay Ramps in Normal Fault Systems. *AAPG Bull.*, 78: 147–165.
- POŻARYSKI W. & ŻYTKO K. 1981 — On the Mid-Polish Aulacogen and the Carpathian Geosyncline. *Bulletin de l'Academie Polonaise des Sciences, Ser. Sci. Terre*, 28: 303–316.
- RAMSAY J.G. & HUBER M. 1987 — The Techniques of Modern Structural Geology, vol. 2. *Folds and Fractures*. Acad. Press, London: 309–700.
- RICHARDS P. & KRANTZ R.W. 1991 — Experiments on fault reactivation in strike-slip mode. *Tectonophysics*, 188: 117–131.
- SHELLART W.P. & NIEUWLAND D.A. 2003 — 3D evolution of a pop-up structure above a double basement strike-slip fault: some insight from analogue modelling. [W:] *Nieuwland D.A. (red.) — New Insight into Structural Interpretation and Modelling*. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 212: 169–179.
- SCHLISCHE R.W., WITHJACK M.O. & EISENSTADT G. 2002 — An experimental study of the secondary deformation produced by oblique slip normal faulting. *AAPG Bull.*, 86: 885–906.
- SCHREURS G. 2003 — Fault development and interaction in distributed strike-slip shear zones: an experimental approach. [W:] *Storti F., Holdsworth R.E. & Salvini F. (red.) — Intraplate Strike-Slip Deformation Belts*. *Geol. Soc., Special Publication*, 210: 35–52.
- SYLVESTER A.G. 1988 — Strike-slip faults. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 100: 1666–1703.
- TERZOPOULOS D. 1983 — Multilevel computational processes for visual surface reconstruction. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 24: 52–96.
- TRUDGILL B.D. 2002 — Structural controls on drainage development in the Canyonland grabens of southeast Utah. *AAPG Bull.*, 86: 1095–1112.
- TWISS R.J. & MOORES E.M. 1992 — *Structural Geology*. Freeman & Co., New York.
- WITHJACK M.O. & CALLAWAY S. 2000 — Active Normal Faulting Beneath a Salt Layer: An Experimental Study of Deformation Patterns in the Cover Sequences. *AAPG Bulletin*, 84: 627–651.
- ZORASTER S. 1996 — Imposing Geologic Interpretations on Computer-Generated Contours Using Distance Transformations, *Mathematical Geology*, 28.