

BUDOWA I MEZOZOICZNO-KENOZOICZNA EWOLUCJA PRZESUWCZEJ STREFY USKOKOWEJ GRÓJCA – WYNIKI INTERPRETACJI DANYCH SEJSMICZNYCH

Structure and Mesozoic-Cenozoic evolution of the Grójec strike-slip fault zone – results of seismic data interpretation

Piotr KRZYWIEC

*Państwowy Instytut Geologiczny;
ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa;
email: piotr.krzywiec@pgi.gov.pl*

Abstract: Interpreted seismic data located within the Grójec fault zone confirmed that this zone could be regarded as a strike-slip fault zone, perpendicular to the main axis of the Mid-Polish Trough. Role of this fault zone during Permian–Early Cretaceous subsidence of the Mid-Polish Trough was minimal, and could have been related to tensional/transensional reactivation of deep structures related to the NW edge of the Małopolska gravity high. In latest Cretaceous – early Paleogene, due to on-going inversion of the Mid-Polish Trough (in transpressional regime) and successive uplift of the Mid-Polish Swell, Grójec fault zone was reactivated. This process could be however most probably regarded as secondary to inversion tectonics and associated strike-slip movements along the NE edge of the Trough/Swell. Inversion of the 4 segment of the Mid-Polish Trough took place in Turonian?–Coniacian–Maastrichtian–early Paleogene.

Key words: inversion, strike-slip movements, Mid-Polish Trough, Grójec fault zone

Słowa kluczowe: inwersja, ruchy przesuwcze, bruzda śródpolska, strefa uskokowa Grójca

WSTĘP

Permsko-mezozoiczny basen polski tworzył wschodni segment systemu epikontynentalnych basenów osadowych zachodniej i centralnej Europy (Ziegler 1990). Zdeponowane w osiowej części basenu, zwanej bruzdą śródpolską, osady permsko-mezozoiczne osiągnęły miąższości wielu kilometrów (por. Dadlez *et al.* 1998, Karnkowski 1999, Kutek 2001). Bruzda śródpolska powstała ponad strefą Teisseyre’a–Tornquista, będącą jedną z najważniejszych granic geologicznych w Europie (por. Kutek & Głazek 1972, Pożaryski & Brochwicz-Lewiński 1978, Dadlez 1997, 1998, Dadlez *et al.* 1995, Stephenson *et al.* 2003).

Jednym z istotnych zagadnień dyskutowanych w kontekście mezozoiczno-kenozoicznej ewolucji bruzdy śródpolskiej jest rola uskoków przesuwczych. Ruchy przesuwcze w obrębie

bruzdy śródpolskiej były postulowane już wcześniej. Według Dadleza (1994, 1997) w trakcie rozwoju tego basenu osadowego ruchy przesuwcze odegrały istotną rolę. Analizując regionalne wykształcenie mezozoicznej pokrywy osadowej postulował on możliwość wystąpienia dwójakiego rodzaju ruchów przesuwczych w obrębie bruzdy: o kierunku NW-SE, tj. zgodnych z jej regionalną osią oraz o kierunku SW-NE, tj. poprzecznych do osi bruzdy. Na możliwość ruchów przesuwczych o kierunku NW-SE, stowarzyszonych z transtensją (trias–jura) a następnie – w trakcie inwersji bruzdy – z transpresją, wskazują wyniki interpretacji danych sejsmicznych z pomorskiego segmentu bruzdy (Krzywiec 2000, 2002). Ruchy przesuwcze na kierunku NW-SE związane z późnokredową inwersją bruzdy śródpolskiej udokumentowano również w obrębie jej segmentu bałtyckiego (Krzywiec *et al.* 2003). Również w obrębie SE (świętokrzyskiego) segmentu bruzdy śródpolskiej udokumentowano ruchy przesuwcze, wykorzystując wyniki modelowań analogowych (Gutowski & Koyi 2007), dane sejsmiczne (Krzywiec 2007, 2009) oraz dane sejsmiczne i grawimetryczne (Krzywiec *et al.* 2009).

Według Dadleza (1994, 1997) ruchy przesuwcze o kierunku NW-SE miały mniejsze znaczenie dla jej regionalnego rozwoju. Inaczej w opinii tego autora wyglądała kwestia poprzecznej segmentacji bruzdy. Zaproponował on 5 regionalnych stref uskokowych: Szczecin–Miastko, Choszczno–Szczecinek, Poznań–Toruń, Sieradz–Łowicz i Tomaszów–Grójec, wyznaczających następujące segmenty bruzdy: nadbałtycki, północnopomorski, południowopomorski, kutnowski, rawski i świętokrzyski. Poprzeczna segmentacja bruzdy zaowocować miała według Dadleza (2003) regionalnymi zmianami miąższości utworów mezozoicznych. Podkreślając, że tak występowanie jak i lokalizacja postulowanych przesuwczych stref uskokowych są spekulatywne, Dadlez (1997) stwierdził, iż na ich istnienie wskazują przede wszystkim przesunięcia osi głównych struktur występujących w obrębie kompleksu cechsztyńsko-mezozoicznego (antyklin, struktur solnych). W oparciu o analizę danych sejsmicznych, grawimetrycznych i magnetycznych postulat poprzecznej segmentacji centralnej i północnej części wału śródpolskiego wykluczono, proponując zupełnie odmienny układ uskoków odpowiedzialnych za subsydencję i późniejszą inwersję bruzdy śródpolskiej (Krzywiec 2006a, b, Krzywiec *et al.* 2006, por. Scheck-Wenderoth *et al.* 2008).

Omawiając strefę Tomaszowa–Grójca Dadlez (1997) podkreślał, iż w obrębie kompleksu cechsztyńsko-mezozoicznego brak jest dowodów na jej przesuwczy charakter, mimo argumentów przedstawionych np. przez Żelichowskiego (1983). Jak pokazały wyniki interpretacji wybranych danych sejsmicznych to właśnie ta strefa uskokowa spośród wszystkich opisywanych i analizowanych przez Dadleza (1994, 1997) ma cechy strefy przesuwczej (Krzywiec 2000, 2002).

Celem prowadzonych badań opisanych w niniejszym artykule było definitywne określenie geometrii, genezy i zasadniczych etapów aktywności mezo-kenozoicznej strefy uskokowej Grójca, określonych w oparciu o wszystkie dostępne dane otworowe i sejsmiczne, w tym najnowsze profile sejsmiczne pomierzone na potrzeby poszukiwań naftowych.

INTERPRETACJA DANYCH SEJSMICZNYCH

Interpretacja danych sejsmicznych ze strefy Grójca (Fig. 1) objęła korelację danych sejsmicznych i otworowych oraz interpretację horyzontów i uskoków. Ze względu na brak danych akustycznych dobrej jakości, do skorelowania głębokościowych danych otworowych z czaso-

wymi danymi sejsmicznymi wykorzystano dane prędkości średnich, dostępne dla wszystkich analizowanych otworów. W oparciu o te dane obliczono tabele czas–głębokość (*time–depth table*), niezbędne dla wyświetlenia głębokościowych danych otworowych na tle czasowych danych sejsmicznych.



Fig. 1. Lokalizacja profili sejsmicznych i kluczowych otworów na tle mapy geologicznej bez kenozoiku (Dadlez *et al.* 2000)

Fig. 1. Location of seismic profiles and key wells at the background of the geological map without Cenozoic (Dadlez *et al.* 2000)

W trakcie interpretacji profili sejsmicznych przeprowadzono finalne dopasowanie danych otworowych. Dzięki precyzyjnemu dowiązaniu danych otworowych do danych sejsmicznych było możliwe zidentyfikowanie na profilach sejsmicznych 18 granic stratygraficznych (Fig. 2, 3). Weryfikacją poprawności dokonanej identyfikacji granic sejsmicznych była ich korelacja przeprowadzona między poszczególnymi otworami – uzyskano w zasadzie 100% zgodność skorelowanych granic, co pozwala na stwierdzenie, iż dane prędkości średnich były w tym wypadku wystarczające dla uzyskania poprawnych wyników.

W kontekście datowania etapów aktywności strefy uskokowej Grójca ważne było precyzyjne określenie stratygrafii utworów zobrazowanych na danych sejsmicznych. Dla całej sukcesji permsko-mezozoicznej nie było z tym żadnych kłopotów, jednak inaczej sytuacja przedstawiała się w przypadku utworów kenozoicznych. Utwory te tylko na najnowszych profilach sejsmicznych zostały zobrazowane w pełni i z wystarczającą szczegółowością. Na starszych profilach pierwsze dwieście-trzysta milisekund jest albo nie zobrazowane albo widoczne tylko częściowo, z niewielką rozdzielczością. Dostępne dane stratygraficzne z otworów Nadarzyn IG-1, Mszczonów IG-1 i IG-2 oraz Wilga IG-2 pokazują jednak, iż na obszarze badań spągową część sukcesji kenozoicznej, zobrazowaną na niektórych profilach sejsmicznych, stanowią utwory paleogenu.

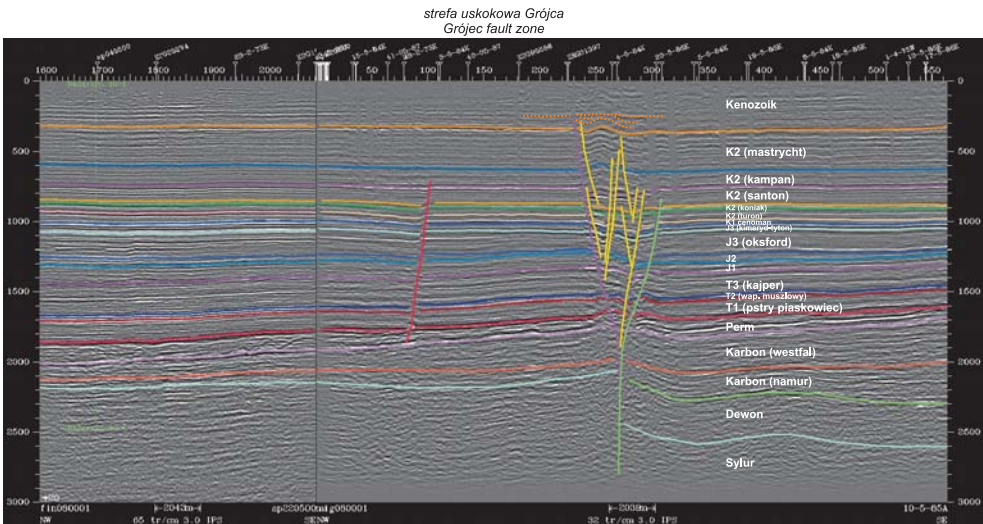


Fig. 2. Zinterpretowany transekt sejsmiczny nr 1 (lokalizacja patrz Fig. 1), obrazujący geometrię strefy uskokowej Grójca, będącej typową strukturą kwiatową, powstałą w efekcie ruchów przesuwczych. Na tym transekcje sejsmicznym strefa ta składa się z jednego głównego (południowo-wschodniego) segmentu i tylko częściowo rozwiniętego segmentu północno-zachodniego, na SW od tego transektu strefa uskokowa Grójca składa się z dwóch segmentów o charakterze struktur kwiatowych (por. Krzywiec 2002). Widoczne w obrębie utworów paleogenu lokalne niezgodności kątowe wskazują na ostatnie etapy aktywności tej strefy uskokowej. Skala pionowa w milisekundach

Fig. 2. Interpreted seismic transect 1 (location see Fig. 1), showing Grójec fault zone as a typical flower structure, associated with strike-slip movements. Along this transect this fault zone consist of one major (SE) segment and only partly formed NW segment, slightly further to the SW from this transect Grójec fault zone consists of two fully developed as a flower structures (cf. Krzywiec 2002). Local angular unconformities within the Paleogene cover point to the latest stages of tectonic activity of this fault zone. Vertical scale in msec

Interpretacja wszystkich dostępnych danych sejsmicznych z obszaru strefy uskokowej Grójca pokazała, iż w jej obrębie obserwujemy jedynie lokalne – w skali regionalnej niewielkie – zmiany miąższości, notowane tylko w bezpośredniej bliskości uskoków tworzących tę strefę uskokową. W skali regionalnej (tj. odpowiadającej długości poszczególnych transektów) zasadniczych zmian miąższości nie stwierdzono. Ten element interpretacji danych sejsmicznych ilustruje transekt sejsmiczny nr 1 (Fig. 2), ułożony prostopadłe do tej strefy uskokowej (por. Fig. 1). Składa się on z dwóch profili sejsmicznych o wysokiej jakości, z zapisem prawie do powierzchni, bezpośrednio skalibrowanych pomiarami prędkości średnich w otworze Nadarzyn IG-1. Na transekcje tym widać dwa segmenty strefy uskokowej Grójca. W jej obrębie widzimy niewielkie zmiany miąższości oksfordu, turonu i kampanu. Spągowa część kompleksu kenozoicznego (paleogen) jest wyraźnie zdeformowana przez SE segment tej strefy uskokowej.

Interpretacja profili sejsmicznych ułożonych prostopadłe do krawędzi wału śródpolskiego pozwoliła na precyzyjne datowanie inwersji tej części wału. Ten aspekt interpretacji danych sejsmicznych pokazany jest na transekcje sejsmicznym nr 2 (Fig. 3). W części SW

tego profilu widać w obrębie permo-mezoziku bardzo charakterystyczny rozkład miąższości, typowy dla stopniowego unoszenia podłoża i redukcji przestrzeni akomodacyjnej. Przy przejściu przez uskok brzeżny, wyznaczający tu granicę inwersji, widzimy wzrost miąższości utworów po dolną kredę–cenoman, natomiast począwszy od turonu?–koniaku widać w obrębie całej górnej kredy bardzo charakterystyczną redukcję miąższości, związaną z syn-sedymentacyjnym procesem inwersji bruzdy śródpolskiej. Strop mastrychtu jest wyraźną powierzchnią erozyjną, ponad którą występują utwory paleogenu, co wskazuje na najpóźniejszy mastrycht–wczesny paleogen jako finalny etap inwersji tego segmentu bruzdy śródpolskiej.

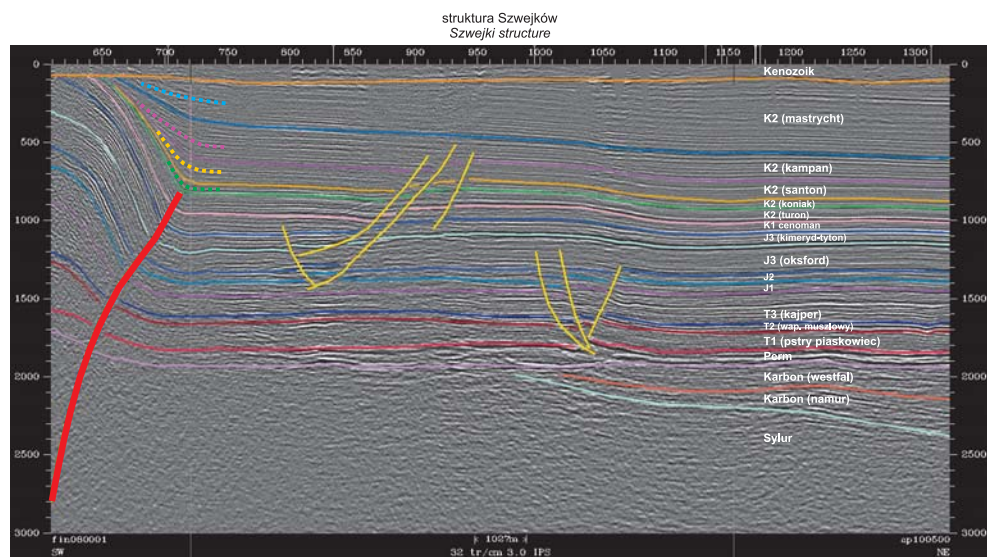


Fig. 3. Zinterpretowany transekt sejsmiczny nr 2 (lokalizacja patrz Fig. 1). Lokalne redukcje miąższości i niezgodności kątowe datują inwersję wzdłuż NE krawędzi bruzdy śródpolskiej (struktura Szwejzków) na turon? – mastrycht/paleogen. Skala pionowa w milisekundach

Fig. 3. Interpreted seismic transect 2 (location see Fig. 1). Local thickness reductions and angular unconformities date inversion along the NE boundary of the Mid-Polish Trough (Szwejki structure) as Turonian? –Maastrichtian. Vertical scale in msec

DYSKUSJA

Interpretacja danych sejsmicznych ze strefy uskokowej Grójca potwierdziła tezę o jej związku z ruchami przesuwczymi (por. Żelichowski 1983, Krzywiec 2002). Strefa ta to klasyczna struktura przesuwcza, w różnych swoich segmentach mająca charakter pozytywnej bądź negatywnej struktury kwiatowej (por. Harding 1985). Tego typu geometria przestrzenna jest charakterystyczna dla stref przesuwczych, w obrębie których następują po sobie lokalne strefy transpresji (tj. lokalnego wynoszenia bloków ograniczonych uskokami brzeżnymi strefy przesuwczej) i transtensji (tj. lokalnego obniżania bloków ograniczonych uskokami brzeżnymi strefy przesuwczej) (por. Christie-Blick & Biddle 1985, McClay 1989, McClay & Bonora 2001).

Bardzo ważnym zagadnieniem dotyczącym ewolucji strefy uskokowej Grójca jest datowanie jej aktywności. W opinii Żelichowskiego (1983) strefa ta aktywna była począwszy od późnej jury, z maksimum swojej aktywności w późnej kredzie i wczesnym trzeciorzędzie. Takie datowanie aktywności oparte było na analizie danych otworowych i sejsmicznych z lat 70. i wczesnych 80. ubiegłego wieku i starszych. Dostępna wówczas siatka danych sejsmicznych nie była zbyt gęsta, a same profile nie były szczególnie wysokiej jakości. Z kolei Hakenberg i Świdrowska (1997, 1998a, b), opierając się na regionalnej analizie danych otworowych zasugerowali aktywność strefy uskokowej Grójca również – choć na różną skalę – w permie, triasie i jurze (subsycendcja bruzdy śródpolskiej) oraz kredzie. W kontekście tych datowań warto jednak zwrócić uwagę na zastosowaną przez tych autorów metodykę: jak sami napisali „*Granice facji i izopachyty interpolowano między otworami wiertniczymi czasami znacznie oddalonymi od siebie. Uskoki istniejące na mapach mezozoiku tego obszaru były brane pod uwagę równocześnie z wyznaczaniem przebiegu izopachyt i granic litofacjalnych. Założono bowiem, że uskoki przejawiające się podczas inwersji mogły być również aktywne jako wcześniejsze uskoki synsedymencyjne*” (Hakenberg i Świdrowska, 1998a). Dane sejsmiczne pokazały, iż można mówić o jedynie niewielkiej (mającej odbicie w niewielkich i bardzo lokalnych zdarzeniach) aktywności tej strefy w trakcie permu, triasu, jury tj. w trakcie trwającej subsycendcji bruzdy śródpolskiej. Wniosek taki jest dość istotnie odmienny od tezy postawionej przez Hakenberga & Świdrowską (1997, 1998a), według których strefa uskokowa Grójca miała duże znaczenie dla poprzecznej segmentacji bruzdy oraz regionalnych rozkładów litofacji i miąższości w czasie całej mezozoicznej ewolucji tego basenu osadowego. Teza ta była efektem zastosowanej przez tych autorów metodyki konstrukcji map paleofacjalnych i paleomiąższościowych – strefa uskokowa Grójca najlepiej widoczna jest w obrębie górnej kredy, co implikuje jej związek z inwersją bruzdy śródpolskiej, i zgodnie z zacytowaną powyżej metodyką, Hakenberg i Świdrowska (1997, 1998a) przyjęli, iż musiała ona być również aktywna na etapie subsycendcji, co zostało zobrazowane na mapach. Wyniki interpretacji danych sejsmicznych takiego wniosku nie potwierdzają – na etapie ekstensji i subsycendcji strefa uskokowa Grójca charakteryzowała się niewielką aktywnością tektoniczną i nie determinowała regionalnych rozkładów facji i miąższości.

Strefa uskokowa Grójca bez wątplenia była aktywna w późnej kredzie, z maksimum aktywności przypadającym na kampan–mastrycht i wczesny paleogen. Oznacza to, że jej ostatnia faza aktywności ściśle koreluje z maksimum fazy inwersji bruzdy śródpolskiej (por. Krzywiec 2006b, 2007, 2009, Krzywiec *et al.* 2003, 2009).

Analiza danych sejsmicznych z obszaru badań dostarczyła również jednoznacznych informacji o datowaniu inwersji w obrębie fragmentu bruzdy śródpolskiej położonego na SW od strefy uskokowej Grójca. Począwszy od turonu? – koniakowi widzimy na danych sejsmicznych wyraźną redukcję miąższości w kierunku wydzwigniętej krawędzi wału śródpolskiego (tj. w stronę struktury Szwejków). Tego typu geometrię związać należy z postępującą redukcją przestrzeni akomodacyjnej w trakcie trwającej inwersji basenu. Tego typu geometria odpowiada obrazowi rozpoznanemu w strefie uskokowej Nowe Miasto–Zawichost (Krzywiec 2002, 2007, Krzywiec *et al.* 2009, Scheck-Wenderoth *et al.* 2008), położonej bezpośrednio na SE od obszaru badań.

Teza o charakterze przesuwczym strefy uskokowej Grójca postawiona przez Żelichowskiego (1983) oparta była na następujących przesłankach: (1) zróżnicowanej budowie podłoża

za podpermskiego po jej obu stronach, (2) geometrii uskoków w obrębie mezozoiku, (3) jej koincydencji z NW granicą grawimetrycznego wyżu małopolskiego, i (4) przesunięciu wychodni kredy na SW od tej strefy (obszar struktury Szwejków). Dwa pierwsze punkty znalazły pełne potwierdzenie w zinterpretowanych danych sejsmicznych.

Na figurze 4 pokazano tektonikę obszaru badań i jego otoczenia na tle mapy grawimetrycznej. Zaznaczono na niej główne strefy uskokowe: strefę Nowe Miasto – Zawichost (por. Krzywiec 2007, Krzywiec *et al.* 2006, 2009), strefę uskokową Skrzynna (Krzywiec 2000, Kowalczewski 2002), uskok świętokrzyski oraz strefę uskokową Szwejków. Pokazano również geometrię strefy uskokowej Grójca, wyinterpretowanej w oparciu o dane sejsmiczne. Jak widać na mapie (Fig. 4), faktycznie zasięg strefy Grójca dokładnie odpowiada NW granicy wyżu małopolskiego. Analizując dane grawimetryczne można również postawić tezę, iż uskok ten raczej nie przedłuża się dalej na SW poza strefę Szwejków wyznaczającą krawędź wału śródpolskiego, tj. iż nie należy raczej mówić o strefie uskokowej Grójec – Tomaszów (por. Dadlez 1994, 1997).

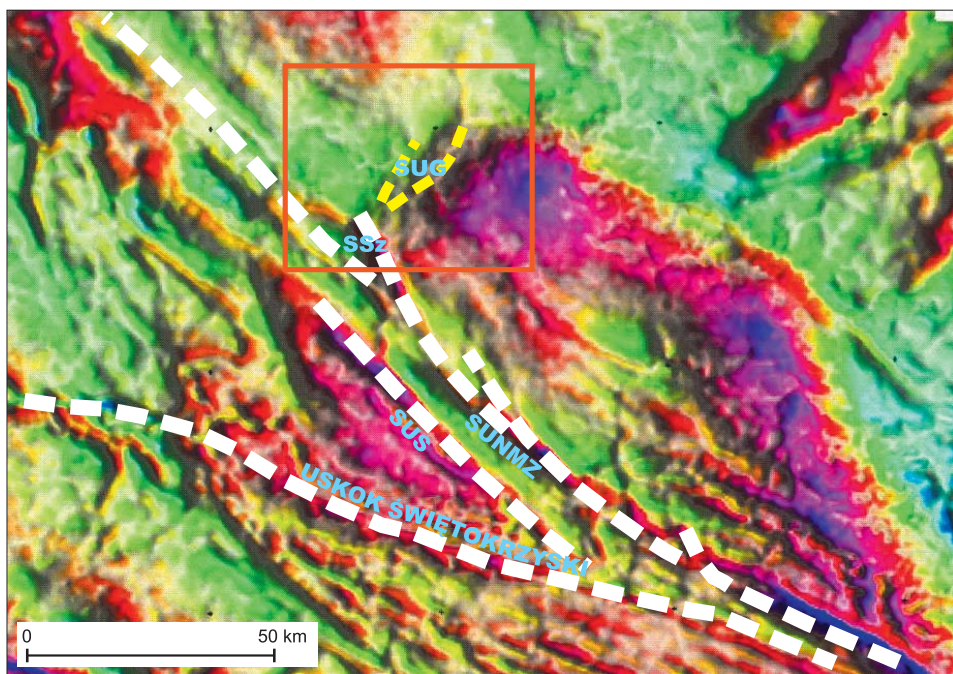


Fig. 4. Tektonika obszaru badań i jego otoczenia na tle mapy grawimetrycznej (pierwsza pionowa pochodna anomalii Bouguera). Czerwony prostokąt – obszar pokazany na figurze 1. Kolory czerwone – dodatnie anomalie grawimetryczne, kolory niebieskie – ujemne anomalie grawimetryczne. SUG – strefa uskokowa Grójca, SSz – struktura Szwejków, SUNMZ – strefa uskokowa Nowe Miasto–Zawichost, SUS – strefa uskokowa Skrzynna

Fig. 4. Tectonic grain of the study area and its surroundings at the background of gravity map (first vertical derivative of Bouguer anomaly). Red rectangle – are shown on figure 1. Red colors – positive gravity anomalies, blue colors – negative gravity anomalies. SUG – Grójec fault zone, SSz – Szwejków structure, SUNMZ – Nowe Miasto–Zawichost fault zone, SUS – Skrzynna fault zone

Żelichowski (1983) pisząc o przesunięciu wychodni kredowych miał na myśli fakt występowania w obrębie krawędzi wału śródpolskiego struktury Szwejków, związanej ze zmiennym zasięgiem kredy (por. Fig. 1). Interpretacja, którą można zaproponować w oparciu o przeprowadzoną analizę danych sejsmicznych jest odmienna. Wydaje się bowiem, iż zasadniczym zjawiskiem zachodzącym w późnej kredzie i paleogenie w tej części bruzdy była jej inwersja, stowarzyszona z istotnymi ruchami przesuwczymi (transpresja), o kierunku generalnie NW-SE, zachodzącymi wzdłuż strefy Nowe Miasto–Zawichost. W efekcie tych ruchów powstały systemy struktur *pop-up* i uskoków *en-echelon*, np. w rejonie Płusów (Krzywiec *et al.* 2009) czy właśnie w strefie Szwejków, stanowiącej SW granicę obszaru badań (por. Fig. 1). Dostępne dane sejsmiczne pozwalają na dość precyzyjne datowanie inwersji w tej strefie na turon?–koniak–mastrycht–paleogen. Z drugiej strony zasadniczy etap aktywności strefy uskokowej Grójca to kampan–mastrycht–paleogen, zaś strefa ta ulokowana jest przy samym NW zakończeniu strefy Szwejków. Dostępne wysokiej jakości dane sejsmiczne pozwalają na stwierdzenie, że obserwowane różnice w zasięgu na NE wychodni kredy nie są spowodowane ruchem przesuwczym wzdłuż strefy uskokowej Grójca.

Biorąc pod uwagę opisaną geometrię pokrywy permsko-mezozoicznej oraz datowanie procesów inwersji i aktywności strefy Grójca można zaproponować odmienny model jej powstania. W permie–jurze jej aktywność była śladowa (w kontekście wpływu na geometrię tej części basenu), i mogła być związana z reaktywacją w warunkach tensji (transtensji) głębokich struktur związanych z NW krawędzią wyżu małopolskiego. W najpóźniejszej kredzie–paleogenie, w związku z postępującą inwersją (w reżimie transpresyjnym) tej części bruzdy i sukcesywnym wzrostem wału śródpolskiego strefa ta uległa istotnej reaktywacji, jednak był to najprawdopodobniej proces potomny w stosunku do inwersji i towarzyszących jej ruchów przesuwczych wzdłuż krawędzi bruzdy/wału.

Wyniki zaprezentowane w niniejszym artykule powstały w ramach projektu badawczego pt. „Rola środbasenowych stref przesuwczych w trakcie subsydencji i inwersji basenów osadowych na przykładzie mezozoicznej ewolucji tektonicznej strefy uskokowej Grójca” (2 PO4D 014 29) finansowanego przez MNiSW. Dane sejsmiczne zostały udostępnione przez firmę Apache Polska. Mapa grawimetryczna pokazana na figurze 4 opracowana została przez doc. dr hab. Stanisława Wybrańca (PIG, Warszawa).

Praca była prezentowana na VII Konferencji Naukowo-Technicznej pt. „Geofizyka w geologii, górnictwie i ochronie środowiska” organizowanej z okazji jubileuszu 90-lecia AGH na WGGiOŚ.

LITERATURA

- Christie-Blick N. & Biddle K., 1985. Deformation and basin formation along strike-slip faults. W: Biddle K. & Christie-Blick N. (eds), *Strike-slip deformation, basin formation, and sedimentation*, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication, 37, 1–34.
- Dadlez R., 1994. Strike-slip movements in the Polish Lowlands. *Geological Quarterly*, 38, 2, 307–318.

- Dadlez R., 1997. Tektonika kompleksu permsko-mezozoicznego. *Prace Państwowego Instytutu Geologicznego*, CLIII, 410–415.
- Dadlez R., 1998. Epikontynentalne baseny sedymentacyjne w Polsce, od dewonu po kredę – zależności rozwoju od budowy skorupy krystalicznej. *Prace Państwowego Instytutu Geologicznego*, CLXV, 17–30.
- Dadlez R., 2003. Mesozoic thickness pattern in the Mid-Polish Trough. *Geological Quarterly*, 47, 3, 223–240.
- Dadlez R., Marek S. & Pokorski J. (red.), 1998. *Atlas paleogeograficzny epikontynentalnego permu i mezozoiku w Polsce (1: 2 500 000)*. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- Dadlez R., Narkiewicz M., Stephenson R.A., Visser M.T.M. & van Wees J-D., 1995. Tectonic evolution of the Mid-Polish Trough: modelling implications and significance for central European geology. *Tectonophysics*, 252, 179–195.
- Dadlez R., Marek S. & Pokorski J. (red.), 2000. *Mapa geologiczna Polski bez utworów kenozoiku*. Państwowy Instytut Geologiczny.
- Dembowska J. & Marek S., 1988. *Mszczonów IG-1, Mszczonów IG-2, Nadarzyn IG1. Profile głębokich otworów wiertniczych PIG*. 65.
- Gutowski J. & Koyi H., 2007. Influence of oblique basement strike-slip faults on the Mesozoic evolution of the south-eastern segment of the Mid-Polish Trough. *Basin Research*, 19, 67–86.
- Hakenberg M. & Świdrowska J., 1997. Propagation of the south-eastern segment of the Polish Trough connected with bounding fault zones (from Permian to the Late Jurassic). *Compte Rendu de l'Académie des Sciences*, Paryż, 324, serie IIa, 793–803.
- Hakenberg M. & Świdrowska J., 1998a. Rozwój południowego segmentu bruzdy polskiej i jego związek ze strefami uskoków ograniczających (od permu do późnej jury). *Przeгляд Geologiczny*, 46, 6, 503–508.
- Hakenberg M. & Świdrowska J., 1998b. Evolution of the Holy Cross segment of the Mid-Polish Trough during the Cretaceous. *Geological Quarterly*, 42, 3, 239–262.
- Harding T.P., 1985. Seismic Characteristics and Identification of Negative Flower Structures, Positive Flower Structures, and Positive Structural Inversion. *AAPG Bulletin*, 69, 4, 582–600.
- Karnkowski P.H., 1999. Origin and evolution of the Polish Rotliegend Basin. *Polish Geological Institute Special Papers*, 3, 1–93.
- Kowalczewski Z., 2002. Late Palaeozoic-Mesozoic development of the Skrzywno Fault (northeastern border of the Holy Cross Mts.). *Geological Quarterly*, 46, 3, 281–291.
- Krzywiec P., 2000. O mechanizmach inwersji bruzdy środkowopolskiej – wyniki interpretacji danych sejsmicznych. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 393, 135–166.
- Krzywiec P., 2002. Mid-Polish Trough inversion – seismic examples, main mechanisms and its relationship to the Alpine – Carpathian collision. W: Bertotti G., Schulmann K. & Cloetingh S. (eds), *Continental Collision and the Tectonosedimentary Evolution of Forelands. European Geosciences Union Stephan Mueller Special Publication Series*, 1, 151–165.
- Krzywiec P., 2006a. Triassic – Jurassic evolution of the Pomeranian segment of the Mid-Polish Trough – basement tectonics and sedimentary patterns. *Geological Quarterly*, 51, 1, 139–150.

- Krzywiec P., 2006b. Structural inversion of the Pomeranian and Kuiavian segments of the Mid-Polish Trough – lateral variations in timing and structural style. *Geological Quarterly*, 51, 1, 151–168.
- Krzywiec P., 2007. Nowe spojrzenie na tektonikę regionu lubelskiego (SE Polska) oparte na wynikach interpretacji danych sejsmicznych. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 422, 1–18.
- Krzywiec P., 2009. Devonian-Cretaceous repeated subsidence and uplift along the Tornquist-Teisseyre Zone in SE Poland – insight from seismic data interpretation. *Tectonophysics*, doi:10.1016/j.tecto.2008.11.020.
- Krzywiec P., Kramarska R. & Zientara P., 2003. Strike-slip tectonics within the SW Baltic Sea and its relationship to the Mid-Polish Trough inversion – evidence from high-resolution seismic data. *Tectonophysics*, 373, 93–105.
- Krzywiec P., Wybraniec S. & Petecki Z., 2006. Budowa tektoniczna podłoża bruzdy śródpolskiej w oparciu o wyniki analizy danych sejsmiki refleksyjnej oraz grawimetrii i magnetyki. *Prace Państwowego Instytutu Geologicznego*, 188, 107–130.
- Krzywiec P., Gutowski J., Walaszczyk I., Wróbel G. & Wybraniec S., 2009. Tectonostratigraphic model of the Late Cretaceous inversion along the Nowe Miasto–Zawichost fault zone, SE Mid-Polish Trough. *Geological Quarterly* (w druku).
- Kutek J., 2001. The Polish – Mesozoic Rift Basin. W: Ziegler P.A., Cavazza W., Robertson A.H.F., Crasquin-Soleau (eds), Peri-Tethys Memoir 6: Peri-Tethyan Rift/Wrench Basins and Passive Margins, *Mémoire Museum Nationale Histoire Natural*, 186, 213–236.
- Kutek J. & Głazek J., 1972. The Holy Cross Area, Central Poland, in the Alpine Cycle. *Acta Geologica Polonica*, 22, 603–653.
- McClay K.R., 1989. Analogue models of inversion tectonics. W: Cooper M.A. & Williams G.D. (eds), Inversion tectonics, *Geological Society of London Special Publication*, 44, 41–59.
- McClay K.R. & Bonora M., 2001. Analog models of restraining stepovers in strike-slip fault systems. *AAPG Bulletin*, 85, 2, 233–260.
- Pożaryski W. & Brochwicz-Lewiński W., 1978. On the Polish Trough. *Geologie en Mijnbouw*, 57, 545–557.
- Scheck-Wenderoth M., Krzywiec P., Zülke R., Maystrenko Y. & Frizheim N., 2008. Permian to Cretaceous tectonics. W: McCann T. (Ed.), *The Geology of Central Europe, Mesozoic and Cenozoic*, 2, 999–1030.
- Stephenson R.A., Narkiewicz M., Dadlez R., van Wees J-D. & Andriessen P., 2003. Tectonic subsidence modelling of the Polish Basin in the light of new data on crustal structure and magnitude of inversion. *Sedimentary Geology*, 156, 59–70.
- Ziegler P.A., 1990. *Geological Atlas of Western and Central Europe*. Shell Internationale Petroleum Maatschappij B.V. and Geological Society of London, 1–239.
- Żelichowski A.M., 1983. Tektonika niecki brzeżnej i jej podłoża między Warszawą a Dębliem w strefie uskoku Grójca. *Biuletyn Instytutu Geologicznego*, 344, 199–224.