

Możliwość zastosowania analizy fałdów niecyldrycznych w rekonstrukcji paleonaprężeń

Ryszard Szczęśny*

Applicability of non-cylindrical fold analysis in reconstructing palaeostresses. Prz. Geol., 52: 1060–1066.

S u m m a r y: Reconstruction of the axes of first order folds was performed to establish the directions of *s*1 stress in the Polish part of the Outer Carpathians. Results of two independent reconstructions were compared. In the first one, only cylindrical parts of folds were analyzed, whereas in the second interpretation, the database was supplemented by selected noncylindrical parts of folds. In regional pattern of *s*1 stress axes, determined using each method, no significant differences are visible. It seems that the orientation of fold axes reconstructed from noncylindrical parts of folds, under certain conditions, could be used as additional data in such reconstructions.

Key words: Poland, Outer Carpathians, palaeostress reconstruction, folds

W polskiej literaturze tektonicznej dotyczącej Karpat Zewnętrznych problem odtwarzania paleonaprężeń poruszany był wielokrotnie. Zasadą było analizowanie danych dotyczących orientacji przestrzennej mezostruktur tektonicznych, zazwyczaj „kruchych”, takich jak spękania ciosowe (Zuchiewicz & Henkiel, 1993; Mastella i in. 1997; Zuchiewicz, 1997; Rubinkiewicz, 1998; Mastella & Zuchiewicz, 2000; Mastella & Konon, 2002) lub uskoki (Mastella & Szynkaruk, 1998; Rubinkiewicz, 2000), niekiedy uzupełnionych analizą fałdów (Tokarski, 1975; Aleksandrowski, 1989; Mastella, 1988; Konon, 2001). Zebrane dane pochodziły zwykle z wybranych fragmentów Karpat zewnętrznych, natomiast wyniki ekstrapolowane były później na całe Karpaty (patrz Aleksandrowski, 1989 — Fig. 21; Mastella & Konon, 2002 — Fig. 12), lub były dowiązywane do istniejących, bardzo ogólnych schematów (np. Konon, 2001 — Fig. 25). Z uwagi na rodzaj analizowanych struktur tektonicznych odtworzona orientacja paleonaprężeń dotyczyła głównie przed i pofałdowych etapów formowania Karpat. Badania podjęte przez autora mają na celu uzupełnienie istniejących interpretacji o rekonstrukcję stanu naprężeń z okresu formowania fałdów, bowiem wykonane są w oparciu o analizę samych fałdów a dokładniej przebiegu ich osi (Szczęśny, 2003a; 2003b). Obserwacjami objęto niemal cały obszar polskich Karpat zewnętrznych (ryc.1). Z powodu ogromnej ilości danych zastosowana przez autora metodyka, oparta na analizie statystycznej, miała na celu wychwycenie wyłącznie regionalnych prawidłowości w przebiegu osi fałdów i ustalenie na tej podstawie ogólnego układu kierunków największego naprężenia poziomego σ_1 w obrębie płaszczowin magurskiej i śląskiej. Ponieważ analizowano obecne położenia warstw i kierunki osi fałdów, zrekonstruowane kierunki głównych naprężeń poziomych dotyczą końcowego efektu kilkietapowych fałdowań z wyraźną przewagą skutków pierwszego, najsilniejszego z nich (Mastella, 1988; Aleksandrowski, 1989; Szczęśny, 2003b).

Danymi będącymi podstawą tych opracowań były pomiary współczesnych położenia warstw pochodzących ze skrzydeł fałdów I rzędu (ryc. 2).

Do odtworzenia kierunków osi fałdów, będących podstawą do rekonstrukcji regionalnego układu naprężeń σ_1 można wykorzystać, według Ramsaya & Hubera (1987), wyłącznie fałdy cylindryczne i subcylindryczne. Autor postanowił zbadać w jakim stopniu uwzględnienie danych pochodzących z wybranych fałdów niecyldrycznych wpłynie na wynik rekonstrukcji pola naprężeń.

*Instytut Geologii Podstawowej, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; szczesny@geo.uw.edu.pl

Tektonika

Polski odcinek Karpat zewnętrznych zbudowany jest z trzech, wzajemnie ponasuwanych na siebie grup płaszczowin: brzeźnej, średniej i magurskiej (Nowak, 1927). Przedmiotem zainteresowań autora były płaszczowiny: śląska, należąca do grupy średniej i magurska będąca głównym elementem grupy o tej samej nazwie (ryc. 3). Powodem takiego wyboru była znaczna rozciągłość obu jednostek tektonicznych co dawało najlepszą możliwość prześledzenia zmienności zjawisk tektonicznych zarówno wzdłuż jak i w poprzek niemal całego polskiego odcinka Karpat zewnętrznych.

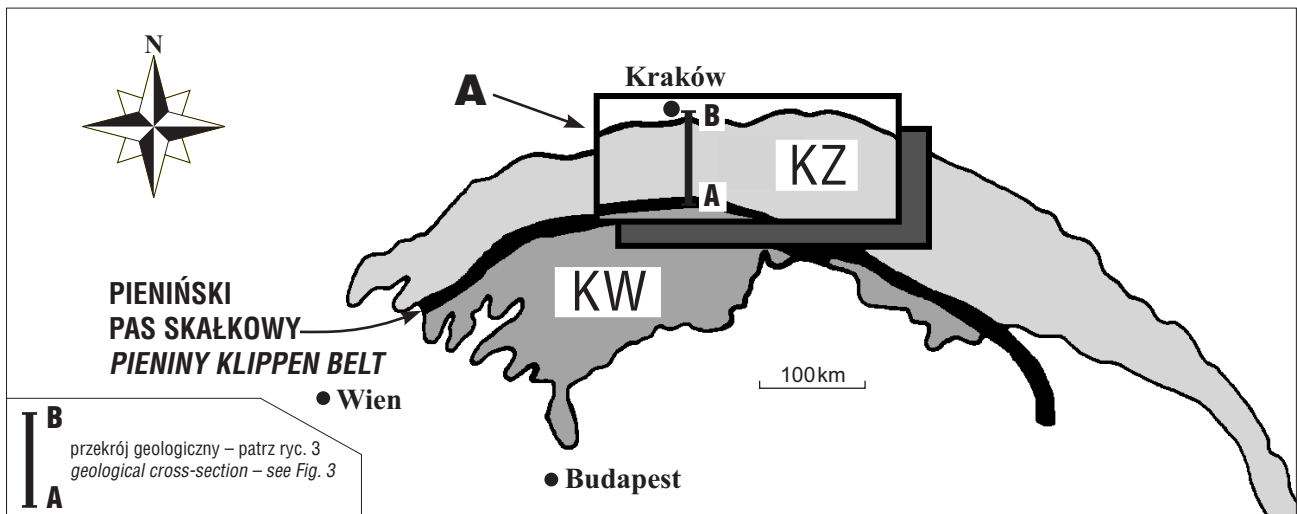
Obie płaszczowiny są silnie sfałdowane (ryc. 3). W ich obrębie wyróżnić można od kilku do kilkunastu równoległych do siebie fałdów (Burtan & Sokołowski, 1952; Sokołowski, 1954; Świdziński, 1958; Książkiewicz, 1972; Żyto i in., 1989). Rozciągłość tych fałdów, zgodna z przebiegiem płaszczowin, ma zasięg regionalny i zwykle przekracza kilkadziesiąt kilometrów (op. cit.). Wyjątkiem są fragmenty zachodniej części płaszczowiny śląskiej oraz centralnej części płaszczowiny magurskiej, które są rozbite na izolowane, zrotowane względem siebie bloki (Świdzki, 1952; Książkiewicz, 1972; Konon, 2001).

Geometria fałdów regionalnych jest w dużej mierze uzależniona od litologii kompleksów skalnych (Książkiewicz, 1958; 1972; Aleksandrowski, 1989). Decydującą rolę odgrywają miększe, sztywne pakiety piaskowców gruboławicowych (np. magurskich czy istebniańskich). W tych małopodatnych warstwach formują się z reguły szerokokomienne synkliny o geometrii zbliżonej do koncentrycznej. Zanikanie piaskowców gruboławicowych i wzrost zawartości łupków wpływa na zmianę geometrii fałdów w kierunku form symilarnych, w różnych ich odmianach (op. cit.).

Drastyczna różnica właściwości fizyczno-mechanicznych pomiędzy pakietami piaskowców i łupków była przyczyną powstania na ich kontaktach odkłuc i utworzenia licznych nasunięć niższego rzędu. Spowodowało to często obserwowaną redukcję południowych skrzydeł synklin i północnych skrzydeł antyklin (Aleksandrowski, 1989; Książkiewicz, 1972).

Metodyka zbierania i grupowania danych

Próba odtworzenia układu naprężeń fałdotwórczych podjęta została na podstawie pomiarów położenia warstw zebranych z opublikowanych arkuszy *Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1 : 50 000* — ryc. 2, (patrz Bugała i in., 1977). Dane te zostały uzupełnione pomiarami



Ryc. 1. Szkic lokalizacyjny; A — obszar badań, KZ — Karpaty zewnętrzne, KW — Karpaty wewnętrzne
 Fig. 1. Location sketch; A — study area, KZ — Outer Carpathians, KW — Inner Carpathians

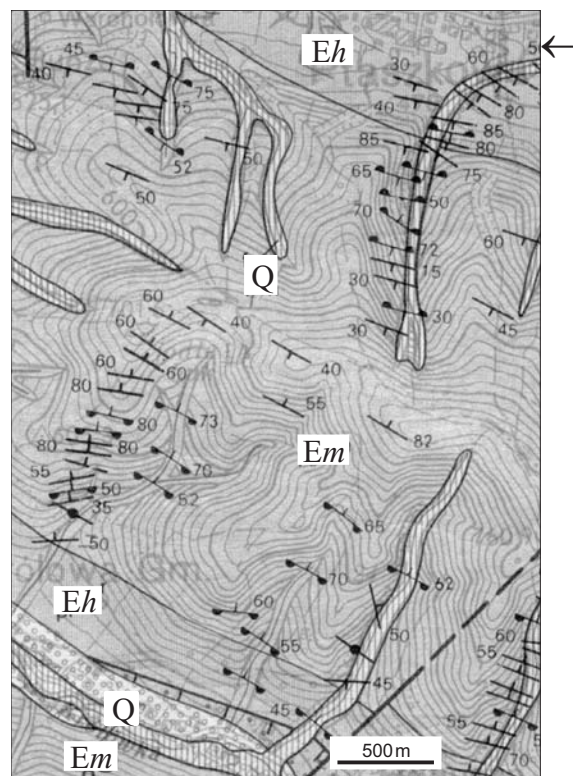
zebranych w trakcie własnych badań terenowych, a także pochodzącymi z map w większych skalach (np. Guzik & Pożaryski, 1950; Książkiewicz, 1958; Węclawik, 1969; Świdziński, 1973; Ryłko, 1992) oraz niepublikowanych map będących załącznikami do prac magisterskich, wykonanych w Zakładzie Tektoniki i Kartografii Geologicznej, Wydziału Geologii Uniwersytetu Warszawskiego. Łącznie dysponowano bazą danych zawierającą ok. 35 000 pomiarów położenia warstw.

Tak obfite informacje nadawały się znakomicie do opracowania statystycznego. W tym celu, zgodnie z zasadami przyjętymi przez Jaroszewskiego (1972) i Mastellę (1988), obszar badań został podzielony na jednorodnie tektonicznie domeny (ryc. 4). Granicami tych domen były według kolejności ważności: nasunięcia, duże uskoki poprzeczne i osie południkowych dolin rzecznych o prawdopodobnych założeniach tektonicznych, a także przeguby fałdów regionalnych. W ten sposób wyznaczono 253 domeny: 137 w płaszczynie magurskiej i 116 w śląskiej. Ilość pomiarów w obrębie tak wyznaczonych domen była wystarczająca statystycznie (patrz Wilson, 1968) i wahała się od 26 z rejonów o wyjątkowo słabym stopniu odsłonięcia np. w okolicach Jawornika (ryc. 4), do 478 z obszarów bardzo dobrze odsłoniętych np. w okolicach Łopusznej (ryc. 4). W większości przypadków liczba pomiarów w pojedynczej domenie mieściła się jednak w przedziale od 100 do 200. Dla każdej z domen sporządzono diagram konturowy położenia warstw, gdzie normalne do płaszczyzn rzutowane były na dolną półkulę równopowierzchniowej siatki Schmidta (ryc. 5).

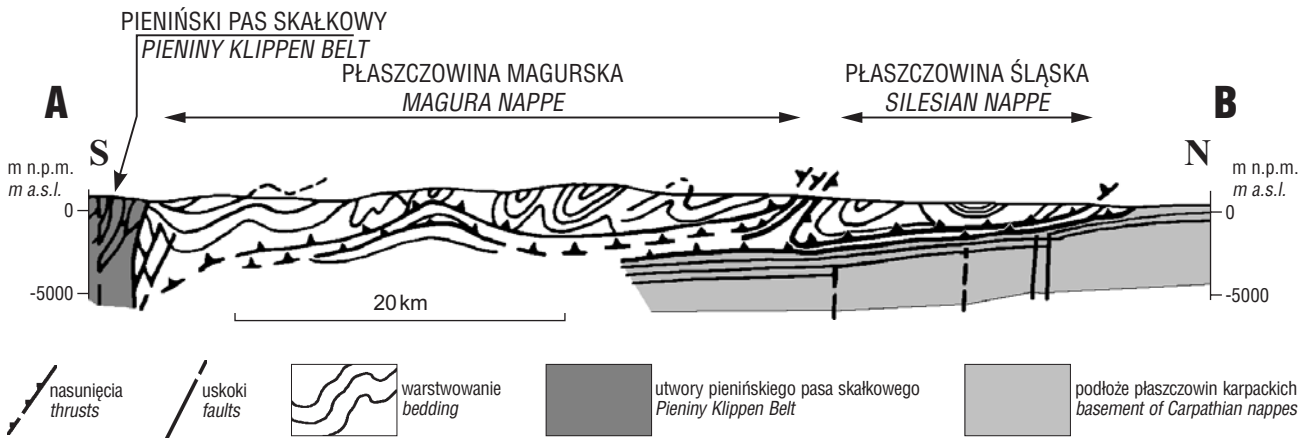
Diagramy zostały opracowane za pomocą programu STERONET. Standardowy zapis położenia warstw — bieg/upad/kierunek upadu przeliczono algorytmem (Korput, 1999) do postaci: azymut kierunku nachylenia/upad wymaganą przez ww program.

Analiza diagramów

Ponieważ analizowano formy fałdowe, na znacznej liczbie diagramów uzyskiwano po dwa maksima odpowiadające najczęstszym położeniom warstw w skrzydłach. Procentowe wartości maksimów były różne, w większości przypadków wyższe wartości miały maksima skrzydeł fałdów nachylonych na południe. Wśród analizowanych fałdów przeważały bowiem formy asymetryczne, nachylone lub obalone na północ (ryc. 5), a zatem wychodnie ich



Ryc. 2. Fragment Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski 1 : 50 000 ark. Grybów (Paul, 1991) — fałd Jaworza — lokalizacja na ryc. 4; Eh — piaskowce cienkoławicowe i łupki — warstwy hieroglify (eocen); Em — piaskowce gruboławicowe i łupki — warstwy magurskie (eocen); Q — aluwia (czwartorzęd);
 Fig. 2. A part of the Detailed Geologic Map of Poland (1:50 000), sheet Grybów (Paul, 1991) — Jaworze fold — for location see fig. 4; Eh — thin-bedded sandstones and shales — Hieroglyphic Beds (Eocene); Em — thick-bedded sandstones and shales — Magura Beds (Eocene); Q — alluvium (Quaternary);



Ryc. 3. Schematyczny przekrój przez polskie Karpaty zewnętrzne według Żytki i in. (1989). Lokalizacja — patrz ryc. 1
 Fig. 3. Schematic cross-section through the Polish Outer Carpathians (after Żytka et al., 1989). Location see Fig. 1

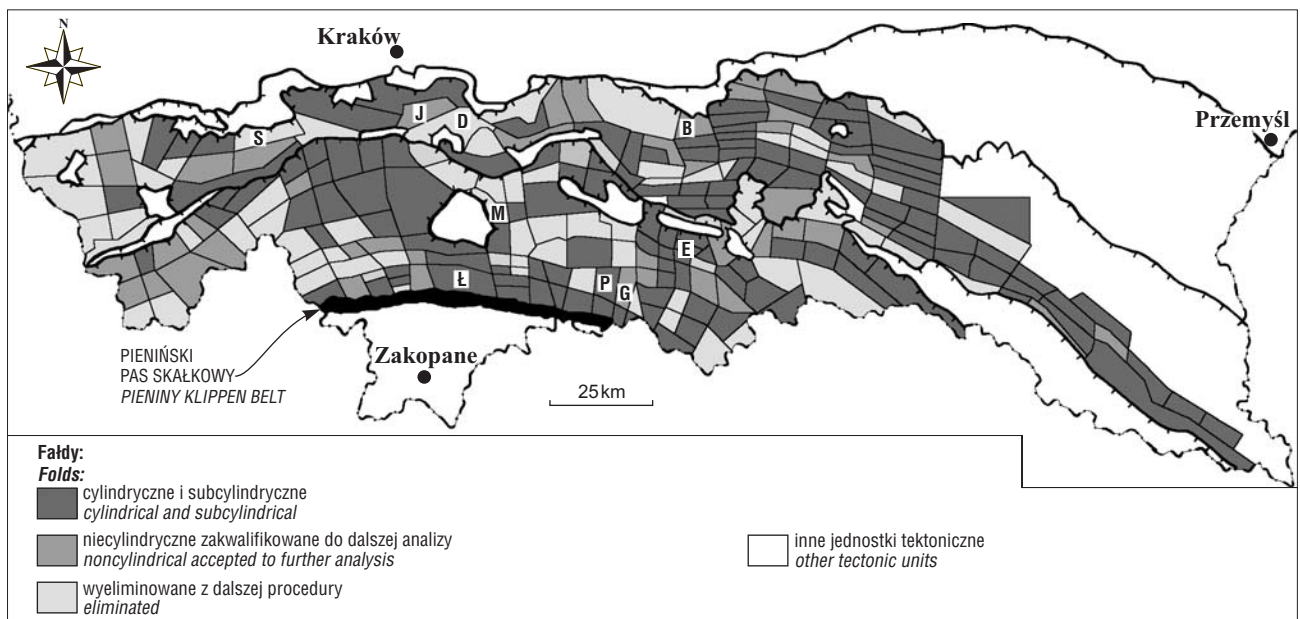
południowych skrzydeł były znacznie szersze (patrz Jaroszewski, 1980).

Z położenia maksimum — dominant w skrzydłach fałdów wyznaczano położenie osi fałdów zgodnie z ogólnie przyjętą metodyką (ryc. 5 i 6A; patrz też: Szczęsny, 2003a — Fig. 3 i 7).

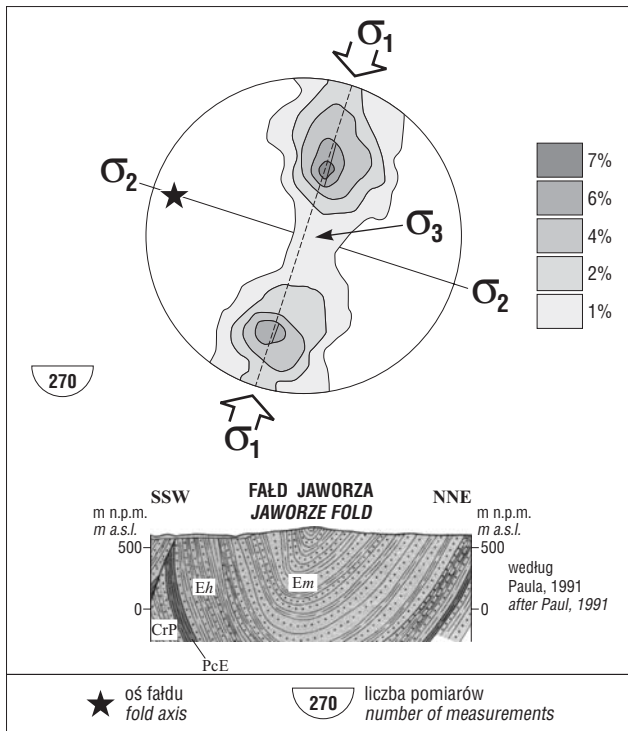
Zgodnie z zaleceniami Ramsaya & Hubera (1987) w ten sposób analizowane mogą być wyłącznie fałdy cylindryczne lub subcylindryczne czyli takie, „...w których powierzchniowo ławic stanowią powierzchnie walcowe (dające się zbudować przez ruch tworzącej...)”, (Dadlez & Jaroszewski, 1994). Warunek cylindryczności lub subcylindryczności jest spełniony gdy na diagramie konturowym ponad 90% biegunów normalnych do warstw leży w odległości, odpowiednio 10° lub 20° od łuku π (Ramsay & Huber, 1987). Ponieważ w rzeczywistości mało które fałdy, zwłaszcza te o znacznej rozciągłości, są w całości cylindryczne (Dubey & Cobbold, 1977) należy je dzielić na mniejsze fragmenty (domeny) spełniające ten warunek i tylko w nich wyznaczać położenie osi (ryc. 6; Ramsay & Huber, 1987).

Kryterium cylindryczności lub subcylindryczności spełniają odcinki fałdów regionalnych w 69 domenach wyznaczonych w płaszczynie magurskiej i 63 domenach w płaszczynie śląskiej (ryc. 4). Nie są natomiast spełnione w 68 domenach w płaszczynie magurskiej i 53 w śląskiej, czyli prawie w co drugiej domenie (ryc. 4). Ponieważ jednak, zdaniem autora, obraz izolinii na części wyeliminowanych diagramów daje szansę wyznaczenia położenia osi fałdu I rzędu (choć ze znacznie mniejszym prawdopodobieństwem) postanowiono zbadać jaki wpływ na ostateczną interpretację miałyby uwzględnienie położenia osi fałdów z tych domen i jakie warunki dodatkowe należałoby wówczas spełnić. Dlatego dalszą część analizy wykonano dwójako. Pierwszy raz ze spełnieniem wymogów Ramsaya & Hubera (1987), drugi z uwzględnieniem danych ze wszystkich domen, w których udało się wyznaczyć (nawet w przybliżeniu) położenie osi fałdu.

W ten sposób baza danych poddana powtórnej analizie została uzupełniona o 21 domen w płaszczynie śląskiej i 22 w płaszczynie magurskiej (ryc. 4).



Ryc. 4. Granice domen tektonicznych — odcinków fałdów I rzędu; B — Brzozowa, D — Dobczyce, E — Jaworze, G — Gaboń, J — Jawornik, Ł — Łopuszna, M — Mogielica, P — Pracza, S — Sułkowice
 Fig. 4. Boundaries of the tectonic domains — parts of the I order folds



Ryc. 5. Diagram konturowy położenia warstw w wybranej domenie wraz ze schematycznym przekrojem przez fałd I rzędu (Jaworze, płaszczowina magurska — lokalizacja na ryc. 2 i 4). PcE — łupki pstre (paleocen–eocen); CrP — piaskowce i łupki — warstwy ropianieckie (senon–paleocen); PcE — łupki pstre (paleocen–eocen); Eh — piaskowce cienkoławicowe i łupki — warstwy hieroglifowe (eocen); Em — piaskowce gruboławicowe i łupki — warstwy magurskie (eocen)

Fig. 5. An example of contour diagram with bed orientation (Jaworze, Magura Nappe — for location see Figs. 2 and 4); PcE — variegated shales (Paleocene–Eocene); CrP — sandstones and shales — Ropianka Beds (Senonian–Paleocene); PcE — variegated shales (Paleocene–Eocene); Eh — thin-bedded sandstones and shales — Hieroglyphic Beds (Eocene); Em — thick bedded sandstones and shales — Magura Beds (Eocene)

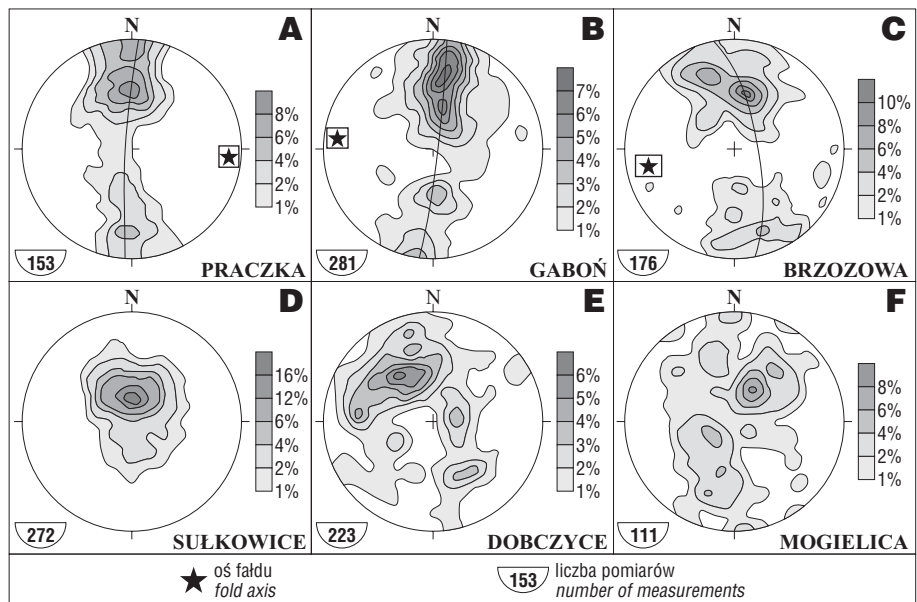
Fałdy niecyldryczne — kryteria doboru

Przeanalizowanie obrazów izoliniowych na diagramach konturowych podsunęło autorowi myśl, iż część z fałdów niecyldrycznych rokuje nadzieję, że na ich podstawie uda się, z pewną dozą prawdopodobieństwa, wyznaczyć kierunek osi fałdu. Wybór wymagał jednak obwarowania szeregiem ograniczeń.

Jeżeli więc na diagramie konturowym pojawiały się więcej niż 2 maksima (najczęściej 3) — do wyznaczenia położenia osi fałdu, podobnie jak postępował Mastella (1988), wybierano położenia warstw z maksimów o najwyższych wartościach pod warunkiem, że dało się przez nie poprowadzić łuk π (ryc. 6 B i C). Uznano bowiem, że położenia warstw dające na diagramach konturowych maksima o podrzędnym znaczeniu mogą być odzwierciedleniem obecności zafałdowań niższego rzędu powstałych w trakcie późniejszych fałdowań w inaczej zorientowanym polu naprężeń. Fałdy II rzędu o przebiegu osi zgodnym (ryc. 6B) lub ukośnym (ryc. 6C) do rozciągłości form nadrzędnych są udokumentowane zarówno w płaszczynie magurskiej (Aleksandrowski, 1989) jak i śląskiej (Szczęsny, 2003b). Nie można również wykluczyć, że zgodnie z poglądami Mastelli (1988) część dodatkowych maksimów jest odzwierciedleniem warstw o biegach skręconych w sąsiedztwie, licznych w Karpa-

tach, poprzecznych stref dyslokacyjnych (por. Burtan & Sokołowski, 1952; Świdziński, 1958; Książkiewicz, 1972; Żytko i in., 1989; Mastella & Szykaruk, 1998). Dlatego też w analizie fałdów I rzędu, przy próbie wychwycenia regionalnych prawidłowości w przebiegu ich osi, anomalne położenia warstw nie były brane pod uwagę.

W dalszej analizie pomijano również domeny, w których na diagramie uzyskano tylko jedno maksimum, co mogło odpowiadać monoklinalnemu zapadaniu warstw (ryc. 6D). W karpackiej rzeczywistości owe „monokliny” są zwykle fragmentami fałdów o skrzydłach wytartych przez nasunięcia (łuski). W takich przypadkach zachowane są zwykle południowe skrzydła antyklin i północne skrzydła synklin (ryc. 3; patrz też: Książkiewicz, 1972; Aleksandrowski, 1989). Wobec braku możliwości odtworzenia położenia warstw w nieistniejących obecnie skrzydłach fałdów, nie można było w sposób wiarygodny ustalić położenia osi tych struktur. Aczkolwiek są znane z



Ryc. 6. Przykłady diagramów konturowych: A — fałd cylindryczny, B — fałd niecyldryczny: z zafałdowaniem niższego rzędu o osi równoległej do przebiegu osi fałdu nadrzędnego, C — z zafałdowaniem niższego rzędu o osi ukośnej do przebiegu osi fałdu nadrzędnego, D — z wytartym skrzydłem, E, F — silnie zdeformowany

Fig. 6. Examples of contour diagrams: A — cylindrical fold, B — noncylindrical fold: with second-order fold parallel to the axis of the first-order one, C — with second-order fold oblique to the axis of the first-order one, E, F — strongly deformed

literatury próby odtwarzania położenia osi fałdów na podstawie interpretacji podobnych diagramów (Rauch, 1999).

Wreszcie, w dalszej interpretacji nie były brane pod uwagę domeny — odcinki fałdów I rzędu, w których rysunek izolinowy na diagramach konturowych był „rozłany” po całym obszarze siatki, i gdzie stwierdzano obecność kilku/kilkunastu maksimów o bardzo niewielkich wartościach procentowych (ryc. 6E i F). Brak uporządkowania położenia warstw w tych domenach oznacza, że zachowane fragmenty fałdów są na tyle zdeformowane przez różne, niemożliwe do określenia czynniki, iż nie można w nich wyznaczyć położenia osi.

Rekonstrukcja kierunków głównego naprężenia poziomego

Wyznaczenie kierunków osi głównych naprężeń na diagramach opierało się na założeniu, że formowanie fałdów w Karpatach Zewnętrznych było zapoczątkowywane w warunkach prostej kompresji horyzontalnej i kontynuowane pod wpływem pary sił w płaszczyźnie pionowej (Mastella, 1988; Fodor i in., 1999). W tych warunkach oś naprężenia największego σ_1 była pozioma. Oś naprężenia pośredniego σ_2 była również pozioma i jednocześnie prostopadła do σ_1 , a jej położenie pokrywało się z kierunkami osi powstających fałdów. Oś naprężenia najmniejszego σ_3 zajmowała położenie pionowe (ryc. 5). Kierunki naprężenia σ_1 wyznaczone w sąsiednich domenach często wyraźnie się różniły (ryc. 7) co sprawiało, że na tej podstawie trudno było określić kierunki regionalnej kompresji. Dlatego wartości azymutów σ_1 przypisane środkom domen o określonych współrzędnych zostały w dalszej kolejności przetworzone wielomianem drugiego stopnia na obraz izolinowy — mapę trendu azymutów σ_1 (ryc. 8). Powierzch-

nie trendu liczono wielomianem drugiego stopnia za pomocą programu RESICAL autorstwa Krzysztofa Nowickiego zaś program SURFER pozwolił na jej graficzne przedstawienie. Izolinie naprężenia σ_1 wskazują miejsca w których osie fałdów, formowanych sukcesywnie w kierunku brzegu płaszczowiny (Pescatore & Ślącza, 1984; Price & Cosgrove, 1990 — fig. 10.41) mają taki sam bieg co oznacza, że poddane były tak samo skierowanemu głównemu naprężeniu poziomemu.

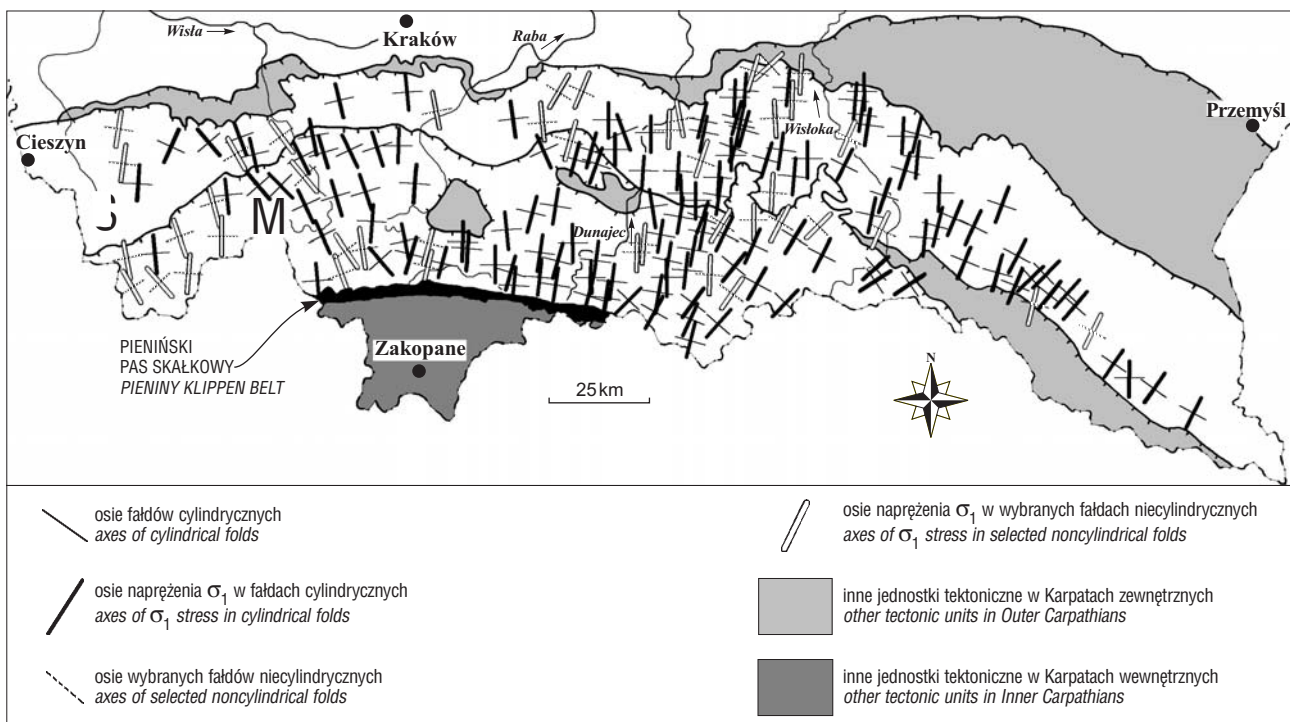
Kierunki naprężenia głównego σ_1 , będące pochodną zrekonstruowanych kierunków osi fałdów w analizowanych domenach, wyznaczonych w polskim odcinku płaszczowiny śląskiej i magurskiej, układają się wachlarzowo, rozbieżnie ku północy (ryc. 7). W środkowej części łuku karpackiego, w strefie jego największego wygięcia ku północy, dominujące kierunki σ_1 mają przebieg południkowy (ryc. 7). We wschodnim fragmencie płaszczowiny odchylają się one ku wschodowi, natomiast na zachodzie — na zachód.

Wyjątek stanowi jedynie skrajnie zachodni fragment płaszczowiny magurskiej gdzie osie naprężenia σ_1 , wbrew ogólnej tendencji, przyjmują położenie bardziej zbliżone do N-S.

Tę anomalię należy jednak traktować z dużą dozą ostrożności gdyż kierunki osi naprężenia σ_1 w tym rejonie wyznaczone zostały w głównej mierze w oparciu o analizę diagramów z domen nie spełniających warunku cylindryczności (ryc. 7).

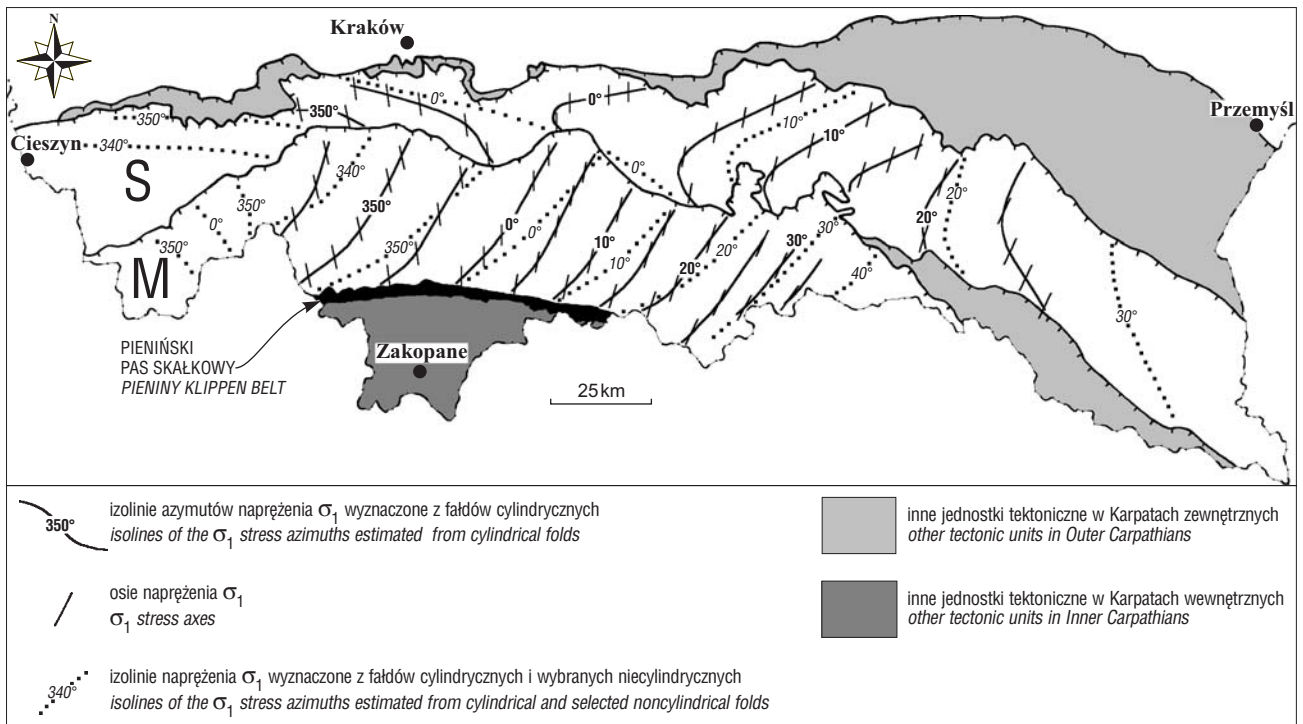
Rekonstrukcja powierzchni trendu na podstawie fałdów cylindrycznych

Obrazy izolinowe pozwalają na znacznie precyzyjniejsze wnioski. Na mapie trendu naprężenia σ_1 (ryc. 8)



Ryc. 7. Rozkład kierunków osi fałdów i osi naprężenia σ_1 wyznaczonych w wybranych domenach (odcinkach fałdów I rzędu) w obrębie płaszczowiny śląskiej i magurskiej S — płaszczowina śląska, M — płaszczowina magurska

Fig. 7. Distribution of the fold axes and axes of the σ_1 stress estimated for the selected domains (parts of I order folds) in the Silesian and Magura nappes; S — Silesian Nappe, M — Magura Nappe



Ryc. 8. Powierzchnia trendu azymutów największego naprężenia poziomego σ_1 S — płaszczowina śląska, M — płaszczowina magurska
Fig. 8. Trend plane of the σ_1 stress azimuths in the Silesian and Magura Nappes; S — Silesian Nappe, M — Magura Nappe

przebiegi izolinii naprężenia σ_1 w płaszczowinie śląskiej wykazują dużą zmienność. W jej zachodniej części mają przebieg WNW–ESE natomiast na wschód od linii Kraków–Zakopane izolinie zmieniają kierunki od NW–SE przy nasunięciu magurskim do NNE–SSW a miejscami nawet NE–SW przy nasunięciu śląskim. Wartości azymutów σ_1 wzdłuż rozciągłości tej płaszczowiny konsekwentnie zmieniają się od 350° na zachodzie do 25° na krańcu wschodnim (ryc. 8).

Tymczasem izolinie naprężenia σ_1 w obrębie niemal całej płaszczowiny magurskiej mają w poprzek płaszczowiny przebiegi z SW na NE (ryc. 8), z delikatną tendencją do skręcania na N. Wartości azymutów σ_1 konsekwentnie zmieniają się z zachodu na wschód od około 345° do 35° (ryc. 8).

Rekonstrukcja powierzchni trendu na podstawie fałdów cylindrycznych i wybranych niecylindrycznych

Przebieg izolinii azymutów naprężenia σ_1 jest w tym przypadku bardzo podobny do wyników uzyskanych wyłącznie na podstawie odcinków fałdów cylindrycznych (ryc. 8). Izolinie uzyskane tą drogą są, w stosunku do izolinii o identycznych wartościach, wyznaczonych z fałdów cylindrycznych, nieco przesunięte ku wschodowi we wschodnich fragmentach płaszczowin, a ku zachodowi we fragmentach zachodnich. Im bliżej brzegów płaszczowin tym większe są rozbieżności w przebiegu izolinii, zwłaszcza w płaszczowinie magurskiej. Różnice w wartościach azymutu naprężenia σ_1 , wyznaczonego jedną i drugą metodą, są największe przy nasunięciu magurskim, w strefie jego największego wysunięcia na północ, aczkolwiek nie przekraczają 6° (ryc. 8). Generalnie jednak różnice te osiągają wartość 2–3° — są więc bliskie wartości błędu pomiarowego.

Jak wcześniej wspomniano, w skrajnie zachodniej części płaszczowiny magurskiej, przebieg wyznaczonych osi fałdów, a w konsekwencji izolinii azymutów σ_1 jest inny niż w pozostałej części tej płaszczowiny. Izolinie biegną tam z SE na NW, a nie z SW na NE (ryc. 8). Niestety nie można stwierdzić czy anomalia ta stanowi regionalną prawidłowość. Na tym obszarze brakuje bowiem wiarygodnego materiału porównawczego — kierunków osi fałdów i izolinii naprężenia σ_1 wyznaczonych na podstawie cylindrycznych odcinków fałdów (ryc. 7, 8).

Rekonstrukcja pola naprężeń

Wiarygodność wyników rekonstrukcji paleonaprężeń w obu badanych płaszczowinach, a uzyskanych z analizy cylindrycznych odcinków fałdów I rzędu (Szczęsny, 2003a) została potwierdzona rezultatami podobnych badań opartych na analizie przedfałdowych spękań ciosowych i pofałdowych uskoków (Mastella i in., 1997; Mastella, 1988; Zuchiewicz & Henkiel, 1993; Mastella & Szykaruk, 1998; Zuchiewicz, 1998; Mastella & Zuchiewicz, 2000; Rubinkiewicz, 2000; Konon, 2001; Mastella & Konon, 2002). Kierunki największego naprężenia poziomego σ_1 odtworzonego w obu badanych płaszczowinach, mają, we wszystkich cytowanych interpretacjach, formę wachlarza rozwartego ku północy. Stopień rozwarcia tego wachlarza jest różny dla obu płaszczowin.

Wnioski

Przeprowadzone w niniejszym artykule porównanie rezultatów analizy baz danych stworzonych wyłącznie z odcinków fałdów cylindrycznych oraz z fałdów cylindrycznych uzupełnionych o wybrane fragmenty fałdów niecylindrycznych dowodzi, że wyniki obu analiz nie różnią

się między sobą w sposób znaczący. Można zatem pokusić się o sformułowanie kilku wniosków praktycznych.

Zastosowanie metod statystycznych do analizy położenia warstw w skrzyżłach fałdów I rzędu prowadzi do wiarygodnych wniosków dotyczących odtworzenia kierunków osi tych struktur, a na tej podstawie rekonstrukcji naprężeń fałdotwórczych na wysokim poziomie uogólnienia — pozwala na interpretacje regionalne. Powyższe badania wymagają jednak dysponowania bardzo liczną bazą danych, pogrupowanych w domeny odpowiadające tektonicznie jednorodnym odcinkom fałdów. Dalsza analiza powinna być prowadzona w zasadzie wyłącznie na podstawie diagramów konturowych, z odcinków fałdów spełniających warunek cylindryczności lub subcylindryczności. Wydają się jednak, że do rekonstrukcji przebiegu osi fałdów I rzędu oraz regionalnego układu osi największego naprężenia poziomego σ_1 dopuścić można, w ograniczonym zakresie, także wybrane fragmenty fałdów niecylindrycznych. W tym jednak przypadku musi być spełnionych kilka warunków:

— na diagramie konturowym fragmentu fałdu niecylindrycznego, spośród kilku maksimum, dwa muszą mieć znaczące udziały procentowe i można przez nie poprowadzić łuk π ;

— kierunek osi fałdu ustalony na tej podstawie nie odbiega w rażący sposób od kierunków osi odtworzonych w sąsiednich domenach będących fragmentami fałdów cylindrycznych;

— przy wyznaczaniu powierzchni trendu, dane o kierunkach osi fałdów w odcinkach niecylindrycznych, mogą być użyte jedynie jako uzupełnienie pomiędzy domenami w których fałdy są ewidentnie cylindryczne;

— interpretacja przebiegu osi fałdów, a co za tym idzie naprężenia σ_1 na dużych obszarach, nie mogą być oparte wyłącznie na podstawie interpretacji domen odpowiadających niecylindrycznym odcinkom fałdów.

Niniejsza praca została wykonana w ramach grantu uniwersyteckiego BW-1607/05.

Autor pragnie w tym miejscu podziękować Panu Prof. dr hab. Leonardowi Mastelli za dyskusję, a recenzentom za słuszne uwagi.

Literatura

ALEKSANDROWSKI P. 1989 — Geologia strukturalna płaszczowiny magurskiej w rejonie Babiej Góry. Stud. Geol. Pol., 46: 1–140.
BUGAŁA J., GUZIK O., SŁOWAŃSKA B. & ROSTKOWSKA W. 1977 — Instrukcja opracowania i wydania Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1:50 000.
BURTAN J. & SOKOŁOWSKI S. 1952 — Mapa tektoniczna Karpat Północnych 1:500 000. Pr. Państw. Inst. Geol., 8. Wyd. Geol.
DADLEZ R. & JAROSZEWSKI W. 1994 — Tektonika. Wydawnictwo Naukowe PWN.
DUBEY A.K. & COBBOLD P.R. 1977 — Noncylindrical flexural slip folds in nature and experiment. Tectonoph., 38: 223–239.
FODOR L., CSONTÓŠ L., BADA G., GYRFI I. & BENKOVICS L. 1999 — Tertiary tectonic evolution of the Pannonian Basin system and neighbouring orogens: a new synthesis of palaeostress data. [W:] Durband B. i in. (red.) — The Mediterranean Basins: Tertiary Extension with the Alpine Orogen. Geol. Soc. London Spec. Publ., 156: 295–334.
GUZIK K. & POŻARYSKI W. 1950 — Fałd Biecha (Karpaty środkowe). Biul. Państw. Inst. Geol., 53.
JAROSZEWSKI W. 1972 — Drobnostukturalne kryteria tektoniki obszarów nieorogenicznych na przykładzie północno-wschodniego obrzeżenia mezozoicznego Gór Świętokrzyskich. Stud. Geol. Pol., 38: 1–187.
JAROSZEWSKI W. 1980 — Tektonika uskoków i fałdów. Wyd. Geol.
KONON A. 2001 — Tectonics of the Beskid Wyspowy Mountains (Outer Carpathians, Poland). Geol. Quarter., 45: 179–204.
KORPUT A. 1999 — Algorytm konwersji klasycznego zapisu położenia płaszczyzn geologicznych na wymagany przez oprogramowanie komputerowe. Prz. Geol., 47: 623–624.

KSIĄŻKIEWICZ M. 1958 — Stratygrafia serii magurskiej w Beskidzie Średnim. Biul. Państw. Inst. Geol., 153. Z badań geologicznych w Karpatach, 3: 43–96.
KSIĄŻKIEWICZ M. 1972 — Budowa geologiczna Polski, Tom IV, Tektonika cz. 3, Karpaty. Wyd. Geol.
MASTELLA L. 1988 — Budowa i ewolucja strukturalna okna tektonicznego Mszany Dolnej, polskie Karpaty fliszowe. Ann. Soc. Geol. Pol., 58: 53–173.
MASTELLA L. & KONON A. 2002 — Jointing in the Silesian Nappe (Outer Carpathians, Poland) — paleostress reconstruction. Geol. Carpathica, 53: 315–325.
MASTELLA L. & SZYNKARUK E. 1998 — Analysis of the fault pattern in selected areas of the Polish Outer Carpathians. Geol. Quart., 42: 263–276.
MASTELLA L., ZUCHIEWICZ W., TOKARSKI A. K., RUBINKIEWICZ J., LEONOWICZ P. & SZCZĘSNY R. 1997 — Application of joint analysis for paleostress reconstructions in structurally complicated settings: Case study from Silesian nappe, Outer Carpathians (Poland). Prz. Geol., 45: 1064–1066.
MASTELLA L. & ZUCHIEWICZ W. 2000 — Jointing in the Dukla Nappe (Outer Carpathians, Poland): an attempt a palaeostress reconstruction. Geol. Quarter., 44: 377–390.
NOWAK J. 1927 — Zarys tektoniki Polski. II Zjazd Słowiańskich Geografów i Etnografów w Polsce. Kraków.
PAUL Z. 1991 — Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski, 1:50 000, Arkusz Grybów. Wyd. Geol.
PESCATORE T. & ŚLĄCZKA A. 1984 — Evolution models of two flysch basins: the Northern Carpathians and the Southern Apennines. Tectonophysics, 106: 49–70.
PRICE N.J. & COSGROVE J.W. 1990 — Analysis of Geological Structures. Cambridge Univ. Press.
RAMSAY J.G. & HUBER M.I. 1987 — The techniques of modern structural geology. Vol. 2, Folds and Fractures. Academic Press Ltd. London.
RAUCH M. 1999 — Pofałdowa dyspersja kierunków w strefie wygięcia płaszczowiny śląskiej w rejonie doliny Dunajca. Prz. Geol., 47: 187–193.
RUBINKIEWICZ J. 1998 — Rozwój spękań ciosowych w płaszczynie śląskiej w okolicach Baligrodu (Bieszczady Zachodnie — Karpaty zewnętrzne). Prz. Geol., 46: 820–826.
RUBINKIEWICZ J. 2000 — Development of fault pattern in the Silesian Nappe: Eastern Outer Carpathians, Poland. Geol. Quarter., 44: 391–403.
RYŁKO W. 1992 — Litostratygrafia płaszczowiny magurskiej w północno-wschodniej części Beskidu Żywieckiego (Karpaty zewnętrzne). Biul. Państw. Inst. Geol., 368: 37–64.
SOKOŁOWSKI S. 1954 — Mapa Geologiczna Karpat Polskich (część zachodnia). Skala 1:200 000. Wyd. Geol.
SZCZĘSNY R. 2003a — Reconstruction of stress directions in the Magura and Silesian Nappes (Polish Outer Carpathians) based on analysis of regional folds. Geol. Quarter., 47: 289–298.
SZCZĘSNY R. 2003b — Stress directions in the eastern part of Silesian Nappe (Polish Outer Carpathians), reconstructed from the second order folds. Ann. Soc. Geol. Pol., 73: 91–101.
ŚWIDERSKI B. 1952 — Z zagadnień tektoniki Karpat północnych. Pr. Inst. Geol., 8: 1–109.
ŚWIDZIŃSKI H. 1958 — Mapa Geologiczna Karpat Polskich (część wschodnia). Skala 1:200 000. Wyd. Geol.
ŚWIDZIŃSKI H. 1973 — Z badań geologicznych w Karpatach. Pr. Geol., 80: 1–109.
TOKARSKI A.K. 1975 — Structural analysis of the Magura Unit between Krościenko and Zabrzeż (Polish Flysch Carpathians). Ann. Soc. Geol. Poln., 45: 327–359.
WĘCIAWIK S. 1969 — Budowa geologiczna płaszczowiny magurskiej pomiędzy Uściem Gorlickim a Tyliczem. Pr. Geol. PAN, 59: 1–101.
WILSON E.B. 1968 — Wstęp do badań naukowych. PWN.
ZUCHIEWICZ W. 1984 — The late Neogene–Quaternary tectonic mobility of the Polish West Carpathians a case study of the Dunajec drainage basin. Ann. Soc. Geol. Pol., 54: 132–189.
ZUCHIEWICZ W. 1997 — Reorientacja pola naprężeń w polskich Karpatach zewnętrznych w świetle wstępnych wyników analizy ciosu. Prz. Geol., 45: 105–109.
ZUCHIEWICZ W. 1998 — Cenozoic stress field and jointing in the Outer West Carpathians, Poland. J. Geodynamics, 26: 57–68.
ZUCHIEWICZ W. & HENKIEL A. 1993 — Orientacja późnokredowych naprężeń tektonicznych w świetle analizy pomiarów spękań ciosowych w SE części Karpat polskich. Ann. Univ. M. Curie-Skłodowskiej, 48: 311–348.
ŻYTKO K., GUCIK S., RYŁKO W., OSZCZYPKO N., ZAJĄC R., GARLICKA I., NEMČOK J., ELIĄŠ M., MENČIK E., DVORÁK J., STRÁŇNIK Z., RAKUS M. & MATEJOVSKA O. 1989 — Geological Map of the Western Outer Carpathians and their foreland without Quaternary formations. Scale 1:500 000. [W:] Geological Atlas of the Western Outer Carpathians and their Foreland (red: D. Poprawa and J. Nemčok). Państw. Inst. Geol., Wyd. Geol.