

OD STRUKTUR ŚLIZGOWYCH DO UKŁADÓW NAPRĘŻEŃ: PRZEGLĄD METOD

UKD 551.243.17.08

W tektonice ośrodków kruchych często stajemy przed zadaniem rekonstrukcji układów naprężeń na podstawie orientacji struktur ślizgowych pokrywających powierzchnie uskoków wtórnych. Zwykle sięgamy wówczas po metodę F. Arthauda (9), której przyswojenie na gruncie polskim zawdzięczamy W. Jaroszewskiemu (20). Użycie jej prowadzi jednak często do wątpliwych rezultatów, proponowany zaś przez jej autora (9) sposób interpretacji diagramów uzyskiwanych za pomocą wprowadzonej przez F. Arthauda konstrukcji graficznej oparty jest na błędnych przesłankach (16, 14, 1). Nie od rzeczy będzie zatem przedyskutować ograniczenia, jakim podlega stosowność metody Arthauda, sposoby interpretacji uzyskanych w wyniku jej użycia diagramów oraz wskazać alternatywne metody analizy zespołów struktur ślizgowych.

Geologia strukturalna rozporządza obecnie w tej dziedzinie dwiema, opartymi na odmiennych podstawach, procedurami graficznymi, zwanymi dalej metodą płaszczyzn ruchu oraz metodą sektorów prostokątnych, jak również kilkoma metodami obliczeniowymi. W niniejszym opracowaniu bliżej scharakteryzowano metody graficzne, jako łatwiejsze, bardziej pogładowe, a także nadające się do „obsługi ręcznej”, przy rutynowym zaś stosowaniu wymagające co najwyżej pomocy popularnego mikrokomputera. Natomiast omówienie metod obliczeniowych, które wymagają zastosowania bardziej zaawansowanego sprzętu komputerowego, ograniczono w zasadzie do wskazania odpowiednich pozycji literatury.

Wszystkie omówione poniżej metody służą poszukiwaniu informacji o orientacji przestrzennej tensora naprężeń macierzystych dla badanej populacji powierzchni ślizgowych (uskoków, luster tektonicznych) oraz (nie dotyczy metody sektorów) o względnej wartości naprężeń głównych (reprezentowanej przez współczynnik $C = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_2 - \sigma_3}$ lub $R = \frac{1}{C}$). Danymi wyjściowymi są zbiory pomiarów orientacji powierzchni oraz rysy ślizgowych. Niezbędna jest też znajomość wzajemnego zwrotu ruchu skrzydeł poszczególnych uskoków (w niektórych metodach zwrot musi być określony dla wszystkich, w innych – dla części analizowanych uskoków).

Oddzielne zagadnienie stanowi wyznaczenie bezwzględnej wartości naprężeń. Można tego dokonać (4) za pomocą konstrukcji Mohra, znając wartość ciśnienia litostatycznego w momencie uruchomienia uskoków (obliczoną z szacunkowej miąższości nadkładu i jego ciężaru właściwego) oraz własności mechaniczne skał zawierających analizowaną populację uskoków (współczynnik Poissona, przebieg obwiedni Mohra).

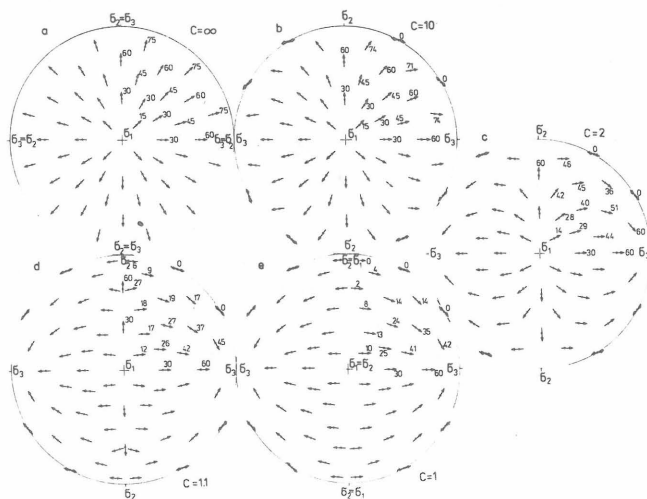
METODA PŁASZCZYZN RUCHU

Konstrukcja graficzna F. Arthauda (9) wykorzystywana w tej metodzie (p. też 20) opiera się na pojęciu płaszczyzny ruchu (płaszczyzny M), prostopadłej do powierzchni uskoku i zawierającej kierunek rysy ślizgowych. Zdaniem F. Arthauda (9) łuki płaszczyzny M odpowiadają-

cych analizowanej populacji luster tektonicznych wykształconych w pojedynczym etapie deformacji (polu naprężeń), po wykreśleniu na siatce Schmidta lub Wulffa, powinny przeciąć się w jednym, dwóch lub trzech punktach. Punkty te reprezentować mają osie występujących w tej samej liczbie wzajemnie prostopadłych pasów (łuków koła wielkiego), grupujących bieguny płaszczyzn ruchu. Punkty przecięcia płaszczyzn ruchu mają jednocześnie wyznaczać osie układu odkształceń zuskokowanego ośrodka, które to osie, zdaniem F. Arthauda, wykazują jedynie pośredni i bliżej nieokreślony związek z orientacją osi naprężeń głównych odpowiedzialnych za utworzenie struktur ślizgowych.

Poglądy F. Arthauda zostały zakwestionowane przez E. Carey (14, 16), która wykazała, że jego metoda interpretacji płaszczyzn ruchu daje zadowalające rezultaty tylko w zastosowaniu do zespołów struktur ślizgowych wykształconych w szczególnych, radialnych polach naprężeń (dwa spośród naprężeń głównych równe co do wielkości). Ponadto jedyna oś deformacji uzyskiwana w takich wypadkach okazała się dokładnie zbieżna z osią obrotu elipsoidy naprężeń.

Układy płaszczyzn ruchu na diagramach strukturalnych dla różnego typu pól naprężeń zostały dokładniej zanalizowane przez autora (1) przez obliczenie z równania Botta (12) teoretycznych kierunków ruchu ślizgowego na różnie zorientowanych płaszczyznach uskoków wtórnych (ryc. 1), a następnie projekcję na siatkę Schmidta odpowia-



Ryc. 1. Kierunki ślizgów (rys) na różnie zorientowanych powierzchniach uskoków wtórnych dla różnych wartości współczynnika C (górną półkulę siatki Schmidta). Strzałki skierowane zgodnie ze zwrotem ruchu skrzydła górnego. Liczby oznaczają kąt nachylenia rysy (wg 1)

Fig. 1. Slip directions on variably oriented fault planes for different C values (upper hemisphere equal-area plot). Arrows directed according to displacement of hanging walls. Numbers denote plunge angles of striae (after 1)

dających tym uskokom płaszczyzn M i ich biegunów (ryc. 2). Uzyskane wyniki, potwierdzając wnioski Carey (14), składają się odmiennie interpretacji układów płaszczyzn ruchu na diagramach strukturalnych w stosunku do oryginalnej koncepcji Arthauda (9). Okazuje się, że zastosowanie konstrukcji graficznej Arthauda do populacji uskoków uruchomionych w tym samym polu naprężeń prowadzi albo do skupiania się biegunów płaszczyzn ruchu w pojedynczy, mniej lub bardziej regularny pas, albo do ich dość chaotycznego rozrzutu po polu projekcji.

Pierwszy wypadek odpowiada zespołom struktur ślizgowych powstałym w polach naprężeń o geometrii radialnej ($\sigma_1 \gg \sigma_2 = \sigma_3$: ryc. 1a, 2a, albo $\sigma_1 = \sigma_2 \gg \sigma_3$: ryc. 1e, 2e) lub zbliżonej ($\sigma_1 \gg \sigma_2 \approx \sigma_3$: ryc. 1b, 2b, albo $\sigma_1 \approx \sigma_2 \gg \sigma_3$: ryc. 1d, 2d), czyli innymi słowy w takich polach naprężeń, w których jedno ze skrajnych naprężeń głównych (σ_1 lub σ_3) wyraźnie różni się swą wartością od obu pozostałych, które w tej sytuacji mogą być traktowane jako w przybliżeniu równe. Geometrię takich pól naprężeń ilustrują elipsoidy naprężeń o kształcie zbliżonym do obrotowego. Zdaniem W. Jaroszewskiego (inf. ustna) pola naprężeń o takiej charakterystyce są w środowiskach deformacji tektonicznej dość pospolite. W scharakteryzowanym wypadku oś pasa rozrzutu biegunów płaszczyzn M na diagramie odpowiada albo położeniu osi największego skrócenia (Z) zuskokowanego ośrodka i zarazem osi największego naprężenia głównego σ_1 , albo też osi największego wydłużenia (X) i zarazem osi σ_3 macierzystego pola naprężeń. W każdym wypadku można to ustalić na podstawie zwrotu ruchu skrzydeł części analizowanych uskoków.

Drugi wypadek (ryc. 1c, 2c), ogólny, pospolity w środowiskach deformacji kruchej, odpowiada zespołom struktur ślizgowych wykształconych w trójosiowych polach naprężeń ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$). Konstrukcja graficzna Arthauda nie wydaje się dostarczać w tym wypadku żadnych wskazówek, które umożliwiłyby rekonstrukcję układu odkształceń, względnie naprężeń. Jednak i tutaj rozkład płaszczyzn ruchu okazuje się nieprzypadkowy, jakkolwiek znacznie trudniejszy do analizy. Stwierdzono (1), że po-

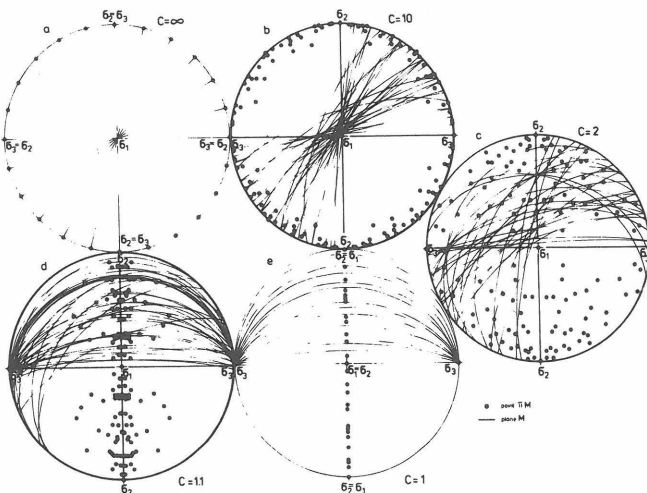
wierzchnie ślizgowe uszeregowane na diagramach w pasy zawierające kierunek jednego z naprężeń głównych charakteryzują się płaszczyznami ruchu wykazującymi jeden wspólny punkt przecięcia, zlokalizowany z kolei w obrębie pasa prostopadłego do osi tego naprężenia, a zatem zawierającego kierunki obu pozostałych naprężeń głównych (ryc. 3).

Na tym spostrzeżeniu oparto procedurę umożliwiającą identyfikację kierunków osi naprężeń głównych pola o geometrii trójosiowej. W skrócie polega ona na wyszukaniu na diagramie wspólnych punktów przecięcia (CIP) trzech i więcej łuków płaszczyzn M, którym odpowiadają bieguny powierzchni ślizgowych uszeregowane w pasy (GCF). W wypadku znalezienia takich pasów, wkreśla się je na diagram wspólnie z pasami rozmieszczenia biegunów płaszczyzn ruchu (GCP) przecinających się w CIP. Punkty przecięcia pasów GCP i GCF wyznaczają położenie osi naprężeń głównych. Niezależnie od tego osie naprężeń głównych lokalizuje się w punktach przecięcia różnych pasów GCF. Po wyznaczeniu orientacji wszystkich trzech osi naprężeń można, niezależnie dla każdej powierzchni ślizgowej, obliczyć współczynnik C charakteryzujący geometrię elipsoidy naprężeń.

Istotnymi wadami omówionej procedury są: jej duża pracochłonność (przy „obsłudze ręcznej”) oraz fakt, że uzyskanie bądź nieuzyskanie rozwiązania uzależnione jest w niej od przypadku: czy w badanej populacji luster tektonicznych znajdzie się dostatecznie wiele powierzchni ślizgowych uszeregowanych na diagramie w pasy i to w dodatku w pasy zawierające jeden z kierunków naprężeń głównych.

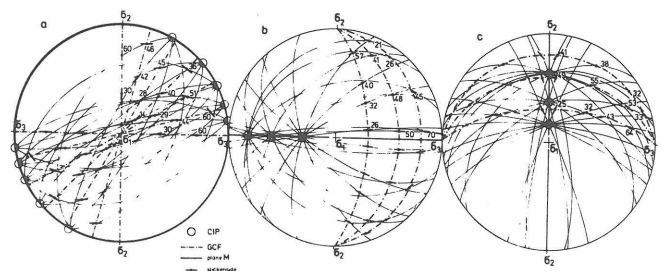
METODA SEKTORÓW PROSTOKĄTNYCH

Na innych podstawach oparta jest metoda sektorów prostokątnych (fr. méthode des dièdres droits, 7), którą stosować można wyłącznie do tych powierzchni ślizgowych, dla których potrafimy określić zwrot ruchu skrzydeł. Jak wiadomo, ruch ślizgowy o określonym zwrocie wzdłuż pojedynczej powierzchni uskoku wtórnego może być efektem wyłącznie takiego pola naprężeń, w którym oś σ_1 zlokalizowana jest w obrębie dwóch przeciwległych prostokątnych sektorów kompresji zawartych między powierzchnią uskoku a prostopadłą do niej i do rys ślizgowych płaszczyzną pomocniczą (ryc. 4). Sektory kompresji rozdzielone są dwoma prostokątnymi sektorami ekstensji, w których zawierają się wszystkie możliwe kierunki osi σ_3 . Opisana metoda polega na wyznaczeniu tych sektorów dla każdego z analizowanych uskoków z osobna, a następ-



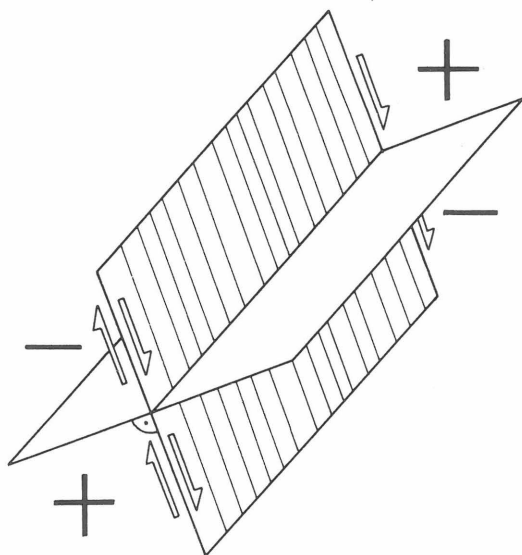
Ryc. 2. Układy płaszczyzn ruchu i ich biegunów dla różnych wartości współczynnika C. Łuki płaszczyzn M tylko dla powierzchni ślizgowych z ćwiartki 0–90° koła projekcji. Bieguny płaszczyzn M dla powierzchni ślizgowych z całego obszaru siatki (wg 1)

Fig. 2. Patterns of M-planes and poles to them for different C values. Traces of M-planes are plotted only for faults from the 0–90° quarter of the projection circle, poles correspond to faults from the whole area of the circle (after 1)



Ryc. 3. Układy płaszczyzn ruchu dla C = 2 wykreślone oddzielnie dla grup uskoków wtórnych, których bieguny powierzchni rozmieszczone są wzdłuż pasów zawierających σ_1 (a), σ_2 (b) i σ_3 (c)

Fig. 3. Movement plane patterns for C = 2 drawn separately for groups of faults distributed along great circles containing σ_1 (a), σ_2 (b) and σ_3 direction (c)



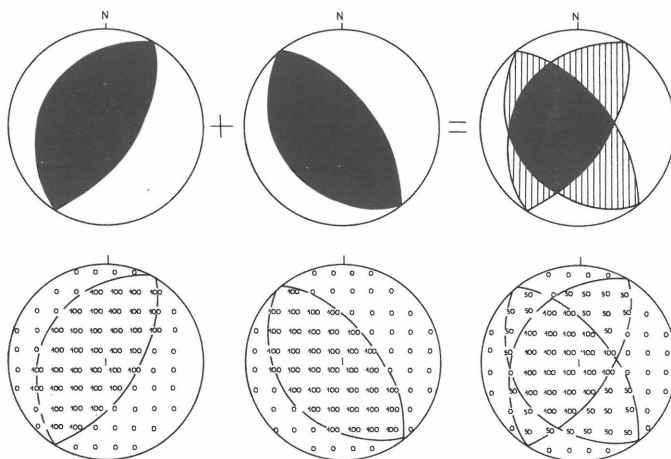
Ryc. 4. Sektory możliwych położenia osi największego (+) i najmniejszego (-) naprężeń głównych związanych z przemieszczeniem wzdłuż powierzchni uskoku wtórnego

Fig. 4. Dihedra of possible directions of the maximum (+) and minimum (-) principal stresses associated with displacement on a preexisting fault

nie na graficznym znalezieniu (na siatce Schmidta lub Wulffa) wycinka przestrzeni wspólnego wszystkim sektorom kompresji i – oddzielnie – wspólnego wszystkim sektorom ekstensji, dla całej populacji uskoczków (ryc. 5). Poszczególnym punktom zliczeniowym w polu diagramu (wyznaczonym np. na podstawie siatki Dmitrijiwici) przyporządkowuje się przy tym wartość liczbowa w procentach (np. wartość 100 w polu diagramu, które wypada w obrębie sektora kompresji wszystkich analizowanych uskoczków, wartość 0 – analogicznie w obrębie sektora ekstensji). Na podstawie tych wartości liczbowych wykreśla się następnie izolinie, które okonturowują najbardziej prawdopodobne położenie osi σ_1 i σ_3 oraz zawierają zwykle wskazówki co do lokalizacji osi σ_2 .

METODY OBLICZENIOWE

Ogólnie sprowadzają się one do różnych sposobów numerycznego wyznaczenia 3 parametrów kątowych oraz parametru R , odzwierciedlających orientację i geometrię „średniego” tensora naprężeń odpowiedzialnych za utworzenie analizowanej populacji ślizgów. Osiąga się to zazwyczaj znajdując przez długotrwałą iterację takie położenie i kształt elipsoidy naprężeń, dla których osiągają minimum różnie w różnych metodach zdefiniowane funkcje opisujące odchylenie rzeczywistych rys ślizgowych od kierunku „rys teoretycznych”, tj. kierunków największego naprężenia ścinającego wyliczonych z równania Botta (12). Do przeprowadzenia żmudnych rachunków niezbędne jest tu zastosowanie techniki cyfrowej. Metody obliczania „średniego tensora naprężeń” zapoczątkowane zostały pracami E. Carey i B. Bruniera (16) i E. Carey (14, 15), a następnie rozwinięte przez R. Armijo i A. Cisternas (11), J. Angeliera wraz ze współpracownikami (2, 3, 5, 8) oraz A. Etchecopara i współautorów (13, 17). Metody Angeliera i Manoussisa (6) oraz Etchecopara i współpracowników (13, 17) pozwalają dodatkowo na numeryczne rozdzielenie generacji ślizgów utworzonych w różnych polach naprężeń (co do analogicznych możliwości



Ryc. 5. Metoda sektorów prostokątnych – idea (wg 7)

Fig. 5. Method of right dihedral – the idea (after 7)

w odniesieniu do metod Carey – 14, 15 oraz Armijo i Cisternas – 11, patrz: 10).

UWAGI KOŃCOWE

Pomyślne zastosowanie omówionych metod uwarunkowane jest mniej lub bardziej ściśle – w zależności od metody – spełnieniem przez analizowane populacje struktur ślizgowych wielu upraszczających założeń.

Wszystkie metody (z wyjątkiem specjalnych procedur w niektórych metodach obliczeniowych) stosuje się do struktur ślizgowych zgrupowanych w pojedyncze generacje wiekowe. W często spotykanych wypadkach współwystępowania zlustrowań kilku generacji, należy zatem już w odkrywce starać się o ich rozdzielenie. Pomocne bywa tu zróżnicowanie morfologii i mineralizacji różnych generacji powierzchni zlustrowań oraz zjawiska superpozycji struktur ślizgowych. Również diagramy strukturalne przedstawiające orientację struktur ślizgowych, sporządzone metodą Hoepfenera-Jaroszewskiego (18, 19), umożliwiają niekiedy „optyczne” rozdzielenie struktur różnych generacji, gdyż populacje struktur wywodzących się z tych samych pól naprężeń układają się na nich w regularne geometryczne wzory (ryc. 1).

W scharakteryzowanych metodach zakłada się, że poszczególne generacje analizowanych ślizgów utworzyły się w jednorodnych polach naprężeń, o niezmiennej (lub wykazującej pewne zdefiniowane fluktuacje, 11) geometrii i orientacji. Przyjmuje się, że ruch na wszystkich uskoczkach zachodził niezależnie i że w wyniku tego ruchu nie dochodziło do rotacji ani do deformacji wewnętrznej bloków międzyuskokowych. Zakłada się też, że przemieszczenia uskoczkowe praktycznie nie wpływały na orientację i geometrię pola naprężeń powodującego te przemieszczenia. Stosując omówione metody przyjmuje się również (nie dotyczy to metody sektorów), że ślizgi na powierzchniach uskoczków wtórnych odbywały się zgodnie z kierunkiem największego naprężenia ścinającego przewidywanego przez równanie Botta (12).

Naturalne zbiory struktur ślizgowych nie zawsze stosują się ściśle do przedstawionych założeń. Wraz z niedokładnościami pomiarów w różny sposób odbija się to na precyzji uzyskiwanych w poszczególnych metodach rozwiązań. Najbardziej wrażliwe na te „zakłócenia” okazują się metody interpretacji płaszczyzn ruchu, gdzie zbyt wysoki „poziom zakłóceń” może wręcz udaremnić

znalezienie rozwiązania. Bardziej odporne na „zakłócenia” są metody obliczeniowe i metoda sektorów, gdzie odstępstwa od warunków modelowych prowadzą jedynie do zwiększenia przedziałów ufności rozwiązań.

Z przedstawionych założeń oraz właściwości procedur geometrycznych i obliczeniowych wynika, że zwiększeniu dokładności rozwiązań sprzyja zebranie możliwie jak największej liczby pomiarów z możliwie jak najmniejszego wycinka terenu (najlepiej z pojedynczych odstępów lub ich fragmentów). Pożądane jest przy tym, aby analizowane populacje uskoków obejmowały powierzchnie ślizgowe o jak najbardziej zróżnicowanej orientacji. Teoretycznie, dla zastosowania większości metod obliczeniowych wystarczy dane dotyczące czterech powierzchni uskoko- wych; metodą sektorów prostokątnych można uzyskać ogólne informacje nawet na podstawie jednego uskoku, jednak w miarę dokładne rezultaty otrzymuje się dopiero dla kilkunastu-kilkudziesięciu powierzchni. Szczególnie wrażliwa na ilościowy niedobór danych okazuje się ponownie metoda płaszczyzn ruchu.

LITERATURA

- Aleksandrowski P. — Graphical determination of principal stress directions for slickenside lineation populations: an attempt to modify Arthaud's method. *J. Struct. Geol.* 1985 vol. 7 no. 1.
- Angelier J. — Sur un apport de l'informatique à l'analyse structurale; exemple de la tectonique cassante. *Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn.* 1975 vol. 17 fasc. 2.
- Angelier J. — Determination of the mean principal directions of stresses for a given fault population. *Tectonophysics* 1979 vol. 56.
- Angelier J. — Analyses qualitative et quantitative des populations de jeux de failles. *Bull. Soc. Géol. France* 1983 t. 15 no. 5.
- Angelier J., Goguel J. — Sur une méthode simple de détermination des axes principaux des contraintes pour une population de failles. *C. R. Acad. Sc. Paris* 1979 t. 288.
- Angelier J., Manoussis S. — Classification automatique et distinction des phases superposées en tectonique de failles. *Ibidem* 1980 t. 290.
- Angelier J., Mechler P. — Sur une méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en séismologie. *Bull. Soc. Géol. France* 1977 t. 19 no. 6.
- Angelier J., Tarantola A., Valette W., Manoussis S. — Inversion of field data in fault tectonics to obtain the regional stress — I. Single phase fault populations: a new method of computing the stress tensor. *Geophys. J. R. astr. Soc.* 1982 vol. 69.
- Arthaud F. — Méthode de détermination graphique des directions de raccourcissement, d'allongement et intermédiaire d'une population de failles. *Bull. Soc. Géol. France* 1969 t. 11 no. 5.
- Armijo R., Carey E., Cisternas A. — The inverse problem in microtectonics and the separation of tectonic phases. *Tectonophysics* 1982 vol. 82.
- Armijo R., Cisternas A. — Un problème inverse en microtectonique cassante. *C. R. Acad. Sc. Paris* 1978 t. 287.
- Bott M.H.P. — The mechanics of oblique slip faulting. *Geol. Mag.* 1959 vol. 96.
- Burg P., Etchecopar A. — Détermination des systèmes de contraintes liés à la tectonique cassante au coeur du Massif Central français: la région de Brioude (Haut-Allier). *C. R. Acad. Sc. Paris* 1980 t. 290.
- Carey E. — Analyse numérique d'un modèle mécanique élémentaire appliqué à l'étude d'une population de failles: calcul d'un tenseur moyen des contraintes à partir de stries de glissement. Thèse 3ème cycle. 1976. Université de Paris Sud.
- Carey E. — Recherche des directions principales de contraintes associées au jeu d'une population de failles. *Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn.* 1979 vol. 21 no. 1.
- Carey E., Brunier B. — Analyse théorique d'une modèle mécanique élémentaire appliqué à l'étude d'une population de failles. *C. R. Acad. Cs. Paris* 1974 t. 279.
- Etchecopar A., Vasseur G., Daignieres M. — An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensors from fault striation analysis. *J. Struct. Geol.* 1981 vol. 3 no. 1.
- Hoepfener R. — Tektonik in Schiefergebirge. *Geol. Rdsch.* 1955 b. 44.
- Jaroszewski W. — Drobnostukturalne kryteria tektoniki obszarów neorogenicznych na przykładzie północno-wschodniego obrzeżenia mezozoicznego Gór Świętokrzyskich. *Stud. Geol. Pol.* 1972 vol. 38.
- Jaroszewski W. — Tektonika uskoków i fałdów. *Wyd. Geol. Wyd. 1 — 1974, Wyd. 2 — 1980.*

SUMMARY

In modern structural geology two graphic procedures, the movement planes method (9, 1) and the method of right dihedral (7), and several computational methods (2, 3, 5, 6, 8, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 19) have been developed, which allow reconstructions of stress fields from orientations of minor fault planes and of slickenside lineations. The applicability of individual methods (in particular the graphic ones), their constraints and advantages are discussed and also some practical instructions are given as to the appropriate ways of data collection in the field.

Translated by the author

РЕЗЮМЕ

Современная структурная геология располагает двумя графическими процедурами: методом плоскостей движения (9,1) и методом прямоугольных секторов (7), а также несколькими вычислительными методами (2, 3, 5, 6, 8, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 19), которые делают возможным реконструирование полей напряжений на основании ориентировки поверхностей разломов и покрывающих их структур скольжения. В статье рассуждаются ограничения и достоинства отдельных методов (особенно графических), а также приведен ряд практических указаний касающихся накопления данных в полевых условиях.