

CHARAKTERYSTYKA I ZNACZENIE LINEACJI EKSTENSYJNEJ

UKD 551.243(234.57)

W wyniku konwergencji i kolizji płyt litosfery dochodzi do intensywnych i heterogenicznych (niejednorodnych) deformacji, głównie typu tektoniki płaszczowinowej (ang. *thrust tectonics*). Deformacje podczas rozwoju stref nasunięć i pakietów płaszczowin są umiejscowione przeważnie w strefach ścinania (ang. *shear zones*) rozległych powierzchniowo, ale o ograniczonych na ogół miąższościach. W strefach tych podczas odkształceń ścinających, odbywających się w warunkach podatnych (ang. *ductile*) powstaje penetratywna foliacja mylonityczna, często o regionalnym

znaczeniu. Na powierzchniach foliacji mylonitycznej rozwija się synchronicznie lineacja mylonityczna, która charakteryzuje się zbliżoną orientacją przestrzenną do kierunku ścinania (wektora przemieszczeń). Lineacja tego typu jest najczęściej określana jako **lineacja ekstensyjna** (ang. *extensional lineation*) lub jako **lineacja z rozciągania** (ang. *stretching lineation*). Znacznie rzadziej jest natomiast definiowana jako **lineacja mylonityczna** (ang. *mylonite lineation*) lub jako **lineacja elongacyjna** (ang. *elongation lineation*).

Lineacja ekstensyjna nie była dotychczas opisywana

w polskiej literaturze, wszakże w ostatnich latach pojawiły się nieliczne wzmianki o tym genetycznym typie struktur liniowych (13, 39). Dlatego też celem niniejszego artykułu jest wypełnienie luki w naszej literaturze geologicznej na temat lineacji ekstensyjnej, która stanowi obecnie podstawę nowoczesnej analizy strukturalnej, wykonywanej w różnej skali i miejscach naszego globu (1, 5–7, 9, 11, 12, 18, 21, 27, 31, 33, 35, 37, 38). Uwzględnienie lineacji ekstensyjnej w analizie strukturalnej Sudetów umożliwi w przyszłości rewizję dotychczasowych poglądów na temat ich ewolucji tektonicznej, opieranej dotychczas na założeniu istnienia w Sudetach wyłącznie B-lineacji (23–25). Do problemu tego powrócimy w końcowej części pracy.

*

Autor serdecznie dziękuje dr S. Cwojdzickiemu za krytyczne przeczytanie artykułu i cenną dyskusję.

CHARAKTERYSTYKA LINEACJI EKSTENSYJNEJ

Geneza. Najważniejszą cechą lineacji ekstensyjnej¹ (lineacji z rozciągania) jest jej zbliżona równoległość w stosunku do osi X elipsoidy odkształcenia końcowego², gdzie $X > Y > Z$ (6, 7, 27, 31). Istnieje obecnie wiele prac teoretycznych i eksperymentalnych oraz szczegółowych analiz różnych zdeformowanych ciał geologicznych, które wskazują, że w homogenicznym i izotropowym środowisku w czasie deformacji ze ścinania każda linia materialna ulega stopniowej rotacji do bliskiej równoległości z osią X elipsoidy odkształcenia końcowego (15, 19, 20, 28–30, 36). Dlatego też w strefach intensywnych deformacji ścinających, rozwijająca się w nich lineacja jest odnoszona na ogół do kierunku X elipsoidy odkształcenia końcowego (6–8, 15, 18, 27). Ogólnie zakłada się, że dla wskaźników materialnych, które wyznaczają w skale lineację ekstensyjną, istnienie równoległości (koaksjalności) lineacji ekstensyjnej z osią X elipsoidy deformacji (ryc. 1) jest możliwe jedynie przy spełnieniu następujących warunków:

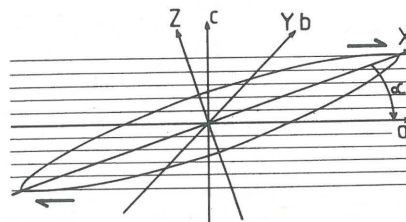
a) deformacja progresywna³ odbywała się bez zmiany kierunku osi Y elipsoidy deformacji, czyli deformacja jest zbliżona do typu odkształcenia płaszczyznowego⁴. W tej sytuacji nie dochodziło praktycznie do zmiany objętości deformowanego materiału;

b) wskaźniki materialne, które definiują lineację ekstensyjną, charakteryzują się brakiem wyraźnego kontrastu geologicznego lub brakiem różnic w lepkości w stosunku do otaczającego je matrix;

c) zaznacza się duży stosunek długości (mierzonej równoległe do osi X) do szerokości (mierzonej równoległe do osi Y elipsoidy odkształcenia końcowego) znaków materialnych, wyznaczających lineację ekstensyjną, czyli stosunek X/Y (według Burga (7) stosunek ten powinien być powyżej pięciu).

Penetracja i wyraźnie rozwinięta lineacja ekstensyjna jest najczęściej, opisywana z różnorodnych mylonitów (1, 8, 9, 21, 39), które rozwijają się w strefach ścinania podatnych (ang. *ductile shear zones*). W takich strefach, w których dominującym mechanizmem odkształcenia jest ścinanie proste (ang. *simple shear*), kierunek ścinania *a* nie ulega zasadniczo zmianie podczas progresywnej deformacji. W miarę wzrostu stopnia deformacji w strefach ścinania dochodzi do stopniowego zmniejszania się kąta między płaszczyzną XY elipsoidy deformacji końcowej a płaszczyzną ścinania *ab* (ryc. 1). Dlatego też dochodzi do progresywnego zbliżania się kierunku ścinania *a* do osi X elipsoidy odkształcenia końcowego – najważniejszej kinematycznej cechy lineacji ekstensyjnej (ryc. 2).

Morfologia. Lineacja ekstensyjna wyznaczona jest w skale przez ciągłą lub nieciągłą elongację (wyciągnięcie) różnych składników mineralnych i (lub) różnych ciał



Ryc. 1. Orientacja osi elipsoidy odkształcenia ($X > Y > Z$) i osi kinematycznych (*a*, *b*, *c*) w deformacji ze ścinania. Kąt α między płaszczyznami XY i *ab* maleje w miarę wzrostu deformacji niekoaksjalnej

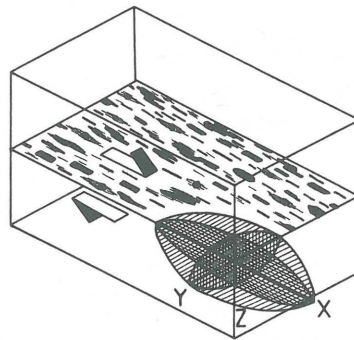
Fig. 1. Orientation of axes of strain ellipsoid ($X > Y > Z$) and kinematic axes (*a*, *b*, *c*) in shear deformation. The angle α between XY and *ab* planes decreases in accordance with growth of rotational deformation

¹ Termin *ekstensja* (poszerzenie, rozciągnięcie), pochodzący od ang. *extension*, podobnie jak termin *skrócenie* (kontrakcja) (ang. *shortening*), odnosi się do odkształcenia ciała geologicznego, które jest zdefiniowane przez elipsoidę odkształcenia. Terminy *tencja* (ang. *tension*) i *kompresja* (ang. *compression*) związane są natomiast z polem naprężeń, określonym za pomocą m.in. elipsoidy naprężeń (19).

² Generalną zasadą w analizie strukturalnej historii odkształcenia ośrodka geologicznego jest przyjęcie, że na danym etapie deformacji odkształcenie może być przedstawione za pomocą dwóch elipsoid: a) *elipsoidy odkształcenia końcowego* (ang. *finite strain ellipsoid*), która opisuje odkształcenie do danego etapu deformacji oraz b) *elipsoidy przyrostu odkształcenia* (ang. *incremental strain ellipsoid*), która definiuje kolejne, na ogół małe, nałożone odkształcenie w kolejnym etapie deformacji (29, 19).

³ Historia zdeformowania skał, która obejmuje etapy odkształcenia od początkowych warunków poprzez całą serię przyrostów deformacji aż do końcowego stanu odkształcenia nazywana jest *progresywną deformacją* (ang. *progressive deformation*, według 29). Progresywna deformacja przedstawiana np. na diagramach Flinna (16) obrazuje kolejne stany elipsoidy odkształcenia końcowego i jej zmiany w czasie przez przyrosty (nakładanie) kolejnych elipsoid przyrostu odkształcenia.

⁴ *Odkształcenie płaszczyznowe* (ang. *plane strain*) jest jednym z typów deformacji homogenicznej, w której oś Y elipsoidy deformacji ma wciąż taką samą długość jak średnica początkowej kuli wyznaczającej elipsoidę odkształcenia, czyli $X > Y = 1 > Z$ (16, 29, 19).



Ryc. 2. Lineacja ekstensyjna zorientowana równoległe do osi X elipsoidy odkształcenia końcowego ($X > Y > Z$). Na powierzchniach foliacji, w przybliżeniu równoległych do płaszczyzny XY elipsoidy odkształcenia końcowego, w strefie intensywnego ścinania (strzałki) rozwinęła się lineacja ziarna mineralnego

Fig. 2. Extensional lineation orientated parallel to the X axis of finite strain ellipsoid ($X > Y > Z$). The mineral lineation was developed on foliation surfaces, which are approximately parallel to the XY plane of finite strain ellipsoid, in the intensive shear zone (arrows)

geologicznych, jak np. skamieniałości, otoczaki, ooidy itp. Typ morfologiczny lineacji ekstensyjnej zależy od wielu czynników, przede wszystkim od składu mineralnego skały, różnicy w lepkości między wyznacznikami lineacji a ich osłoną (matrix), wielkości i kształtu minerałów, typu odkształcenia stopnia intensywności deformacji, historii metamorfizmu i progresywnego odkształcenia (19, 22, 28).

Penetratywna w skali regionalnej lineacja ekstensyjna jest najczęściej opisywana z mylonitów, a zwłaszcza ze zmylonityzowanych granitów, np. z granitów południowego Tybetu (6). Lineacja z rozciągania jest tam wykształcona przez kierunkowe, równoległe ułożenie porfiroklastów skaleni, pasemkowych agregatów plagioklazów i kwarcu, a także przez dłuższe osie soczewek kwarcu i wyciągniętych skupień łyszczyków na powierzchniach foliacji. Podobną lineację ekstensyjną opisano z granitu Cape Conrad w Australii (9), gdzie uporządkowana, wymiarowa orientacja kryształów skaleni alkalicznych i wyciągniętych agregatów kwarcu, łyszczyków i plagioklazów jest prawie równoległa do osi wyciągnięcia ksenolitów, a nawet lineacji typu rys ślizgowych na powierzchniach C⁵. Wszystkie te elementy strukturalne wyznaczają główny kierunek ruchu tektonicznego, który odpowiada w przybliżeniu osi X (osi maksymalnej ekstensji) elipsoidy odkształcenia końcowego (30).

Lineację ekstensyjną opisywano także z migmatytów, w których jest ona wyznaczona przez wyciągnięcie porfiroblastów skalenia potasowego i agregatów biotyty i syllimanitu (37). Penetratywna lineacja w ortognejsach jest na ogół także lineacją z rozciągania (ryc. 3). Lineacja ta jest wyznaczona przez wyciągnięcie porfiroblastów mikroklinu, soczewek kwarcu i agregatów kwarcowo-plagioklazo-

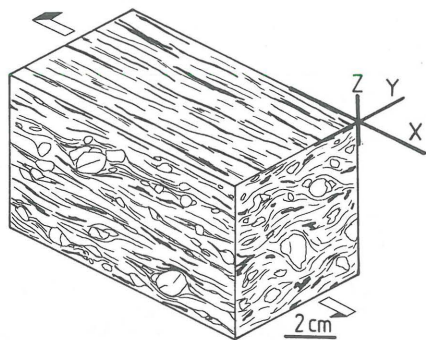
wych oraz ukierunkowanie łyszczyków na powierzchniach foliacji, np. w gnejsach mylonitycznych okolic Dusznik Zdroju w Górach Orlickich (ryc. 3, por. 39). Podobnie wykształcona lineacja roddingowa jest opisywana w wielu ortognejsach (granitach zmylonityzowanych w warunkach podatnych) na całym świecie (2, 8, 11, 21, 27). Lineację mylonityczną, ułożoną równoległe do osi X elipsoidy odkształcenia końcowego, opisywano również z perydotytów, m.in. w formie lineacji enstatytu typu „lamellar enstatite lineation” (14, 36).

LINEACJA EKSTENSYJNA A STRUKTURA FAŁDOWE

Typową cechą stref ścinania podatnego jest występowanie lineacji mineralnej typu ekstensyjnego, która jest zorientowana równoległe do osi drobnoskalowych fałdów (5, 21). Koaksjalność ta jest trudna do interpretacji, ponieważ przyjmowano powszechnie, że osie fałdów powstały w kierunku równoległym do osi Y elipsoidy odkształcenia końcowego, natomiast mineralna lineacja ekstensyjna rozwijała się w kierunku zbliżonym do osi X elipsoidy deformacji. Jest to jeden z największych problemów dotyczących lineacji, który sprowadza się do pytania: jak interpretować lineację (nie tylko mineralne, ale także wyznaczone np. przez skamieniałości lub otoczaki), które są wyciągnięte równoległe do osi fałdów (4, 19).

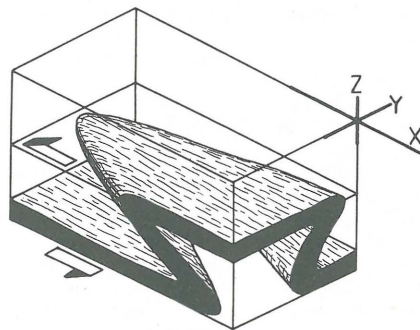
Obecnie przyjmuje się, że najbardziej prawdopodobnym mechanizmem powodującym koaksjalność lineacji i osi drobnych fałdów jest rotacja osi fałdów w kierunku zbliżonym do równoległości z lineacją ekstensyjną w strefach ścinań (2, 5, 15, 21, 32). Najlepszym dowodem na zginanie linii przegubowej fałdów w strefach ścinań są fałdy futerałowe (ang. *sheath folds*) (26). Fałdy futerałowe (ryc. 4) przy krzywiźnie linii przegubowej dochodzącej do 180° mogą stać się fałdami oczkowymi (ang. *eye folds*) (32). Rozwój fałdów futerałowych został udowodniony eksperymentalnie (10) i opisany matematycznie (36).

Orientacja. Lineacje ekstensyjne rozwijają się w strefach ścinań. Powstanie stref ścinań związane jest albo z tektoniką płaszczwinową albo z tektoniką przesuwczą (ang. *wrench* lub *strike-slip tectonics*), bądź też z ich kombinacją. Przyjmując brak późniejszych reorientacji tych stref, horyzontalne i równoległe do granic stref ścinania ukierunkowanie lineacji ekstensyjnej wskazuje na dominację mechanizmów przesuwczych w czasie rozwoju stref ścinania



Ryc. 3. Blokdiagram przedstawiający morfologię lineacji ekstensyjnej w ortognejsach bystrzyckich z okolic Dusznik Zdroju, typ precykowy (rodding). Wokół dużych oczek skaleniowych dochodzi do wykrzywienia powierzchni foliacji, szczególnie dobrze jest to widoczne na powierzchniach YZ. Duże oczka skaleniowe połączone są przez cienkie smugi drobno zgranulowanych skaleni i agregatów kwarcowo-skaleniowych. Oczka skaleniowe ze strukturami cieni ciśnien wskazują na stały zwrot ścinania (płaszczyzna XZ)

Fig. 3. Three-dimensional diagram showing morphology of extensional lineation in Bystrzyce orthogneisses in the Duszniki-Zdrój area; rodding type. Around large feldspar augens the foliation surface gets distorted; particularly it is visible on YZ surfaces. Large feldspar augens contacts each other with thin strips of fine-grained feldspars and quartz-feldspar aggregates. Feldspars augens with pressure shadow structures indicate stable sense of a shear vector (XY plane)



Ryc. 4. Rotacja osi fałdu do prawie równoległości z osią X elipsoidy odkształcenia końcowego w strefach ścinań prowadzi do rozwoju fałdów futerałowych

Fig. 4. Rotation of fold axis to a near-parallelism with the X axis of finite strain ellipsoid in shear zones leads to development of the sheath folds

(ryc. 5). Natomiast lineacje ekstensyjne zorientowane prostopadle do biegu granic stref ścinania świadczą o rozwoju systemów płaszczowin i nasunięć (ryc. 5). W przypadku innych orientacji lineacji ekstensyjnej mamy do czynienia z połączeniem mechanizmów przesuwczych i nasunięciowych (ryc. 5).

ZNACZENIE LINEACJI EKSTENSYJNEJ

Dla rozważań strukturalnych szczególnie ważne jest ustalenie czy lineacja ekstensyjna, wyrażona na ogół przez lineacje mineralne w strefach ścinania, może być jednoznacznie interpretowana jako kierunek transportu tektonicznego i, co więcej, czy może ona być wskaźnikiem kinematycznym ruchu płyt litosfery (7, 22, 28). Należy podkreślić, że nie ma prostych i jednoznacznych zależności między elipsoidą końcowego odkształcenia a ruchami względnymi na granicach deformowanych mas skalnych (4, 29). Dokładniej mówiąc, nie można wprost wnioskować o przemieszczeniach mas skalnych jedynie na podstawie orientacji lineacji ekstensyjnej. Lineacja ekstensyjna musi być rozpatrywana w połączeniu z innymi wskaźnikami kinematycznymi (17).

W przypadku odkształceń płaszczynowych kierunek transportu tektonicznego jest wyznaczony przez linię intersekcji płaszczyny (XZ) prostopadłej do foliacji z powierzchnią ograniczającą strefę ścinania (płaszczyzna XY), czyli kierunek transportu tektonicznego pokrywa się z osią X elipsoidy odkształcenia końcowego (ryc. 2). W sytuacji nałożonych ścinania prostych o różnych kierunkach ścinania na równoległych powierzchniach lineacja ekstensyjna zajmuje różne kierunki między osią X a Y elipsoidy deformacji końcowej (4, 7). Sytuacja ta jest jeszcze bardziej skomplikowana w przypadku odkształceń niepłaszczynowych, gdzie dochodzi do zmian objętości deformowanego

materiału i możliwej ekstensji w kierunku prostopadłym do osi X, czyli w kierunku równoległym do osi Y i (lub) nawet osi Z elipsoidy odkształcenia końcowego. Dlatego też należy pamiętać, że kierunek transportu tektonicznego (wektor przemieszczeń) nie może być bezpośrednio i jednoznacznie wyznaczany jedynie na podstawie orientacji lineacji ekstensyjnej, chyba że:

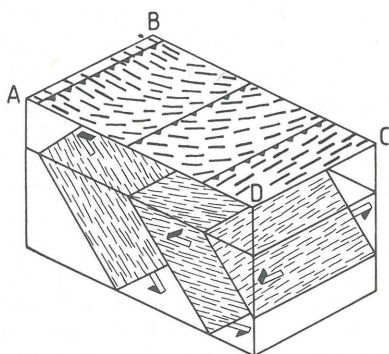
- deformacja jest zbliżona do odkształcenia płaszczynowego,
- kierunek transportu nie uległ zmianie podczas historii deformacji,
- nie istniały znaczne różnice w lepkości i (lub) kompetencji między wskaźnikami lineacji a matrix skały.

Przy zmianie kierunku ścinania podczas deformacji progresywnej, orientacja lineacji ekstensyjnej, zwłaszcza na małym obszarze, jest wypadkową wielu kierunków przemieszczeń mas skalnych. W takich przypadkach konieczna jest analiza całego zdeformowanego obszaru aż do jej granic. O zmianie transportu tektonicznego w czasie deformacji świadczą najlepiej skomplikowane przebiegi (trajektorie) lineacji ekstensyjnej na mapach strukturalnych (ryc. 5, 6). Regionalnym przykładem może być masyw armorykański, gdzie początkowo doszło do nasunięć poprzecznych, a następnie do ścinania podłużnych względem granic stref kolizji (7). Lineacja ekstensyjna jest tam synchroniczna z metamorfizmem sylursko-dewońskim i charakteryzuje się orientacją poprzeczną, skośną i podłużną do granic stref kolizji płyt (7).

Także dla innych pasm orogenicznych wykorzystuje się z powodzeniem orientację penetratywną, regionalnej lineacji ekstensyjnej do wnioskowania o ruchach różnych jednostek geologicznych (ryc. 6). Orientacja lineacji ekstensyjnej znalazła zastosowanie między innymi do analizy pasm orogenicznych w Afryce (12, 35) oraz Himalajów (35) i waryscydów europejskich (7, 27).

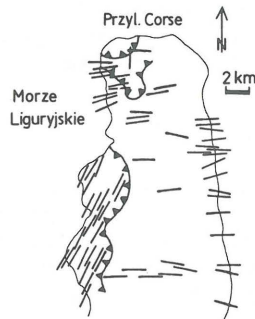
POLIFAZOWE LINEACJE EKSTENSYJNE

Na orientację i intensywność wykształcenia lineacji ekstensyjnej ma również wpływ transpozycja i reaktywowanie wcześniej powstałych powierzchni foliacji podczas kolejnych faz deformacji (3). Mogą występować tutaj dwa skrajne przypadki. W pierwszej sytuacji w czasie rozwoju starszej foliacji nie wykształciła się żadna lineacja ekstensyjna na powierzchniach foliacji. Powstanie lineacji ekstensyjnej było związane z młodszą fazą deformacji podczas reaktywowania starszej foliacji. W tej sytuacji powstająca



Ryc. 5. Blokdiagram ilustrujący zmianę w orientacji lineacji ekstensyjnej. Płaszczyzna ABCD to mapa trajektorii lineacji ekstensyjnej. Lineacja poprzeczna (lewa część mapy) związana jest z płaszczyną nasunięcia. Lineacja podłużna (prawa część mapy) związana jest z prawoskrętną strefą przesuwczą. Lineacja skośna do granic struktur (środkowa część mapy) powstała w wyniku kombinacji składowych nasunięciowych i przesuwczych. Również zmiana kąta upadu stref ścinania wpływa na kształt trajektorii lineacji na mapie projekcji tej lineacji

Fig. 5. Three-dimensional diagram showing a change in orientation of extensional lineation. ABCD plane = map of extensional lineation trajectories. Transverse lineation (left side of the map) is connected with thrust surface. Longitudinal lineation (right side of the map) is connected with dextral wrenching zone. Lineation oblique to the boundaries of structures (centre of the map) originated as an effect of combination of thrust and strike-slip elements. Also the change of angle of dip of shear zones influences on lineation trajectory shape on the projection map of this lineation

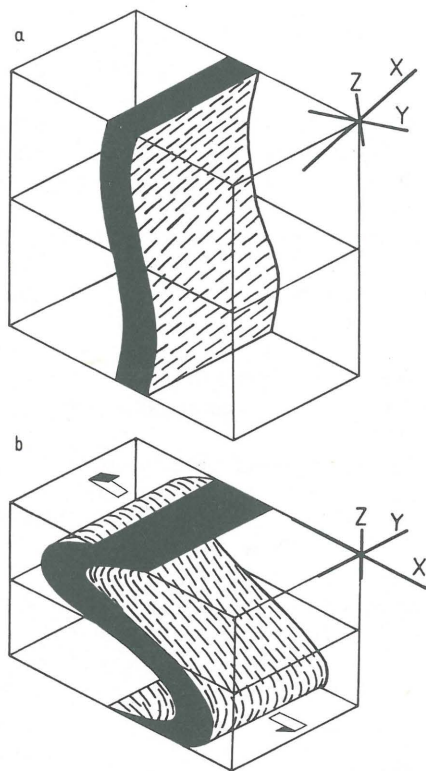


Ryc. 6. Przykład poprzecznych, podłużnych i skośnych lineacji ekstensyjnych względem linii nasunięć wśród alpejskich struktur północnej części Korsyki. Według L. Harris (18), uproszczone

Fig. 6. An example of relation between transversal, longitudinal and oblique lineations and thrust lines in alpine structures in northern Corsica. Based on Harris (18), simplified

lineacja ekstensyjna jest ułożona równoległe do płaszczyzny XZ elipsoidy odkształcenia końcowego.

W drugim, bardziej realnym przypadku w czasie pierwszej fazy deformacji na powierzchniach synchronicznie rozwijającej się foliacji powstała penetratywna lineacja ekstensyjna. Lineacja ta jest zorientowana skośnie względem płaszczyzny XZ elipsoidy odkształcenia końcowego (ryc. 7b), ale jest równoległa do płaszczyzny XZ elipsoidy przyrostu odkształcenia podczas pierwszej fazy deformacji (ryc. 7a). Starsza lineacja ekstensyjna została podczas młodszej fazy deformacji zrotowana, a także wyraźniej



Ryc. 7. Schematyczne blokdiagramy ilustrujące wpływ reaktywowania foliacji na orientację lineacji ekstensyjnej

a – szerokopromienne zafaldowanie foliacji z lineacją ekstensyjną, która jest prawie równoległa do osi fałdów, b – podczas kolejnej deformacji wcześniejsza lineacja ekstensyjna ulega rotacji na skrzydłach nowych fałdów wąskopromiennych do prawie równoległości z linią intersekcji płaszczyzny XZ elipsoidy odkształcenia końcowego ze skrzydłem fałdu. Rotacja zafaldowanej lineacji ekstensyjnej spowodowana była reaktywaniem zafaldowanej foliacji na skrzydłach fałdu wąskopromiennego, bez konieczności rotacji osi fałdów do kierunku X elipsoidy odkształcenia końcowego, jak w przypadku rozwoju fałdów futerałowych. Zauważ reorientację osi X, Y, Z podczas kolejnych faz deformacji

Fig. 7. Schematic three-dimensional diagrams showing influence of foliation reactivation on the orientation of extensional lineation

a – open, broad fold of foliation with extensional lineation, which is almost parallel to the fold axes, b – during consecutive deformation, the earlier extensional lineation undergoes rotation on the flanks of new narrow fold till it is nearly parallel to the intersection line between plane XZ of finite strain ellipsoid and flank of the fold. Rotation of folded extensional lineation is caused by reactivation of folded foliation on the flanks of narrow fold, without necessity of rotation of fold axes toward the X direction of finite strain ellipsoid, as it was in a case of sheath folds development. Note reorientation of the X, Y, Z axes during consecutive deformation phases

morfologicznie wykształcona przez procesy dynamicznej rekryształizacji. Dlatego też nie obserwuje się nadrukowania reaktywowanej foliacji (4). W ten sposób jest tłumaczona zmiana orientacji lineacji ekstensyjnej wokół fałdów F_2 w strefach nasunięcia w Mount Isa (Australia) (4).

Zmiana orientacji lineacji ekstensyjnej jest szczególnie dobrze widoczna na mapach strukturalnych, obejmujących duże obszary (ryc. 6). Zmiana przebiegu lineacji ekstensyjnej wśród alpejskich struktur Korsyki jest tłumaczona zmianą kierunku nasunięć w czasie ich rozwoju (18). Podobny model zaproponowano wcześniej dla umiejscowienia perydotytów Sierra Bermeja (Hiszpania), rozwijających się w wyniku kombinacji tektoniki nasunięciowej i przesuwowej, a odzwierciedlonej na mapach strukturalnych przez systematyczną zmianę orientacji lineacji ekstensyjnej (14). Podobnie zinterpretowano, wykorzystując zmiany kierunków lineacji ekstensyjnej, rozwój struktur waryscydu europejskich (7), jednak bez uwzględnienia w tej analizie Sudetów.

LINEACJA EKSTENSYJNA W SUDETACH

W pracy J. Oberca i J. Kotowskiego (23) stwierdzono między innymi, że: „od szeregu lat badacze geologii Dolnego Śląska poświęcają wiele uwagi zagadnieniu lineacji, pod której pojęciem rozumieją przede wszystkim lineację B” (str. 534) i dalej, że „za B-lineację tektoniczną uważa się takie struktury linijne, których orientacja przestrzenna jest równoległa... do osi dużych fałdów powstałych w tej samej fazie tektonicznej” (str. 534). Prowadzi to do wniosku, że każda parakinematyczna lineacja, bez względu na jej orientację względem innych lineacji powstałych podczas tej samej fazy deformacji, jest lineacją typu B (25). Lineacja ziarna mineralnego i lineacja roddingowa (precikowa) była i jest nadal w Sudetach interpretowana jako tzw. B-lineacja (23–25). Lineacja typu B uważana jest za lineację równoległą do osi Y elipsoidy odkształcenia (25, 39).

W świetle natomiast przedstawionych powyżej, z konieczności skrótowo, rozważań na temat lineacji ekstensyjnej, która jest najczęściej wyznaczona przez lineację mineralne i rodding, wynika że znaczna część lineacji typu B jest w Sudetach w rzeczywistości lineacją ekstensyjną, m.in. w gnejsach izerskich i śnieżnickich. Należy jednak zawsze pamiętać, że w strefach ścinania lineacje ekstensyjne są w przybliżeniu równoległe do osi X elipsoidy odkształcenia końcowego, o ile spełniony jest warunek mechanizmu ścinania prostego i odkształcenia płaszczyznowego. W pozostałych przypadkach lineacje ekstensyjne zajmują położenie pośrednie między osiami X i Y elipsoidy. Zależy to głównie od typu deformacji, wyrażonej przez kształt elipsoidy deformacji (16). W przypadku deformacji rotacyjnej (niekoaksjalnej) lineacja ekstensyjna nie wyznacza wprost transportu tektonicznego (7). W takich warunkach lineacje te wskazują jedynie kierunek ruchów dyferencyjnych, np. między skrzydłami fałdów (4) lub poszczególnymi łuskami w pakiecie płaszczowin (34).

Ponieważ rozwój lineacji ekstensyjnych jest związany ze strefami ścinania, to należy w przyszłości rozpoznać takie strefy również w Sudetach. Prawdopodobnie najmniej sporów wzbudzi wyznaczenie kruchych stref ścinania (ang. brittle shear zones) według klasyfikacji J.G. Ramsay'a (30), których rozwój odbywał się w przypowierzchniowych partiach skorupy ziemskiej (uskoki, brekcje tektoniczne, kataklazyty). Rozwój stref ścinania w warunkach podatnych lub podatno-kruchych, odbywających się w głębszych partiach skorupy, nawet w warunkach facji granulitowej metamorfizmu regionalnego, jest dość dobrze

udokumentowany w różnych częściach świata, ale jeszcze nie w Sudetach. Dlatego też do głównych zadań geologii strukturalnej w Sudetach będzie należało przede wszystkim rozpoznanie stref ścinania, ustalenie lineacji ekstensyjnej, określenie zwrotu i wielkości przemieszczeń różnych struktur sudeckich, w tym także ewentualnych terranów.

Dotychczasowe schematy ewolucji strukturalnej Sudetów ulegną zapewne znacznym modyfikacjom. Pierwszym krokiem w tym kierunku jest praca P. Rajlicha (27) przedstawiająca kierunki lineacji ekstensyjnej na obszarze Masywu Czeskiego, w tym także niektórych jednostek sudeckich. Rozpoczął się więc okres rewizji dotychczasowych poglądów na temat tektoniki Sudetów opartych na nowych podstawach, ale to jest już temat odrębnego artykułu.

WNIOSKI

1. Lineacja ekstensyjna rozwija się na powierzchniach foliacji w strefach ścinania podatnego, podatno-krucho i krucho, i dąży do równoległości z osią X elipsoidy odkształcenia końcowego. W warunkach niejednorodności środowiska geologicznego i (lub) deformacji rotacyjnej lineacja ta nie wyznacza kierunku osi X, ale jedynie kierunek ruchów dyferencyjacyjnych między poszczególnymi domenami skalnymi.

2. Lineacja ekstensyjna wyznaczona jest na ogół przez lineację mineralną i (lub) przeciekową, i jest ułożona w przybliżeniu równoległe do osi fałdów futerałowych lub prawie prostopadłe do osi fałdów ze zginania przed ich rotacją w stosunku do osi X elipsoidy odkształcenia.

3. Lineacja ekstensyjna rozwijając się w strefach ścinania jest związana z tektoniką nasunięciową lub przesuwcą bądź też ich połączenia. Dlatego też orientacja lineacji ekstensyjnej może wyjaśnić geometrię stref ścinania i tak:

- strefy nasunięć wyznaczone są na ogół przez małe kąty nachylenia i prostopadłe kierunki lineacji ekstensyjnej do granic stref ścinania,
- strefy przesuwcze wyznaczone są zasadniczo przez prawie horyzontalne i równoległe zorientowane lineacje ekstensyjne,
- zmiennosc kątów nachylenia i kierunków lineacji ekstensyjnej wskazuje na kombinację mechanizmów nasunięciowych i przesuwczych w czasie różnych faz deformacji lub zmiennosc transportu tektonicznego w czasie jednej fazy deformacji.

4. Lineacje ekstensyjne, pomimo swoich ograniczeń, są obecnie jednym z podstawowych kryteriów kinematycznych do określania ruchu płyt litosfery w różnych pasmach orogenicznych od proterozoiku aż po kenozoik.

5. Lineacja ekstensyjna występuje także w Sudetach, gdzie w większości jest uważana za lineację typu B, czyli lineację równoległą do osi Y elipsoidy odkształcenia końcowego.

LITERATURA

- Begg G., Burg J.P., Wilson C.J. — Australian Journal Earth Sci. Victoria, 1987 vol. 34 s. 95–110.
- Bell T.H. — Tectonophysics, 1978 vol. 44 s. 285–320.
- Bell T.H. — J. Metamorphic Geol., 1986 vol. 4 s. 421–444.
- Brun J.P. — Geol. Rund. 1978, vol. 67 s. 305–313.
- Bryant B., Reed J.C. — Geol. Mag., 1969 vol. 106 s. 412–429.
- Burg J.P., Brunel M. i in. — J. Struct. Geol., 1984 vol. 6 nr 5 s. 535–542.
- Burg J.P., Bale P., Brun J.P., Girardeau J. — Bull. BRGM, 1987 nr 4 s. 71–87.
- Burg J.P. — J. Struct. Geol., 1987 vol. 9 s. 925–934.
- Burg J.P., Wilson C.J.L. — Australian J. Earth Sci., 1988 vol. 35 s. 1–13.
- Cobbold P.R., Quinquis H. — J. Struct. Geol., 1980 vol. 2.
- Coward M.P. — J. Struct. Geol., 1984 vol. 6 s. 89–99.
- Coward M.P., Daly M.C. — Precambrian Res., 1984 vol. 24 s. 27–45.
- Cymerman Z. — Prz. Geol., 1988 nr 2 s. 77–81.
- Darot M., Boudier F. — Petrologie, 1975 vol. 1 s. 225–236.
- Escher A., Watterson J. — Tectonophysics, 1974 vol. 22 s. 223–231.
- Flinn D. — Quart. J. Geol. Soc. London, 1962 vol. 118 s. 385–433.
- Hanmer S. — J. Struct. Geol., 1986 vol. 8 s. 111–122.
- Harris L. — Ibidem, 1985 vol. 7 s. 637–650.
- Hobbs B.E., Means W.D., Williams P.S. — An outline of structural geology. John Wiley and Sons Inc. New York, 1976.
- Jaeger J.C. — Elasticity, fracture and flow with engineering and geological applications. Methuen London, 1969.
- La Tour T.E. — Geol. Soc. Am. Bull., 1981 vol. 92 s. 997–1038.
- Lister G.S., Williams P.F. — Tectonophysics, 1983 vol. 92 s. 1–33.
- Oberc J., Kotowski J. — Roczn. Pol. Tow. Geol., 1971 t. 41 s. 533–552.
- Oberc J., Kotowski J. — Ibidem, s. 603–620.
- Oberc J., Kotowski J. — Ibidem, 1977 t. 47 s. 193–212.
- Quinquis H., Audren C. i in. — Nature, 1978 vol. 273 s. 43–45.
- Rajlich P. — Geol. Rund., 1987 vol. 76 s. 755–786.
- Ramberg H. — Tectonophysics, 1975 vol. 28 s. 1–37.
- Ramsay J.G. — Folding and fracturing of rocks. Mc. Graw-Hill New York, 1967.
- Ramsay J.G. — J. Struct. Geol., 1980 vol. 2 s. 83–100.
- Ramsay J.G. — Spec. Publ. Geol. Soc. London, 1981 vol. 9 s. 293–309.
- Rhodes S., Gayer R.A. — Geol. Mag., 1977 vol. 114 s. 329–341.
- Roering C., Smit C.A. — J. Struct. Geol., 1987 vol. 9 s. 419–427.
- Sanderson D.H. — Tectonophysics, 1982, vol. 88 s. 201–233.
- Shackleton R.M., Ries A.C. — J. Struct. Geol., 1984 vol. 6 s. 111–117.
- Skjernaa L. — Intern. Conf. on Shear Zones in Rocks. University of Barcelona, 1979 s. 25–26.
- Tubia J.M., Cuevas J. — J. Struct. Geol., 1986 vol. 8 s. 473–482.
- Vogler W.S. — Geol. Rund., 1984 vol. 73 s. 175–206.
- Żelaźniewicz A. — Acta Geol. Pol., 1984 nr 1–2 s. 111–130.

SUMMARY

The present paper is aimed at the presentation of genesis and characteristics of extensional (stretching) lineation and at its significance for structural analysis. Extensional lineation is formed on foliation surfaces in ductile shear, ductile-brittle shear, and brittle shear zones. This lineation is mostly marked out by morphological forms of linear structures of mineral lineation type or rodding lineation type. The orientation of extensional lineation tends to almost total co-axiality with X – axis of finite strain ellipsoid during an activity of simple shear mechanisms. The extensional lineation is often orientated approximately parallel to the axes of synchronic sheath folds.

Development of extensional lineation, like as of shear zones, is connected with thrust tectonics and/or strike-slip

РЕЗЮМЕ

Целью статьи является представление генезиса и характеристических свойств экстенсивной линейности (из растяжения), а также ее значения в структурном анализе. Экстенсивная линейность образуется на плоско-параллельных поверхностях в зонах пластичного, несущего и хрупкого скальвания. Эта линейность определена чаще всего морфологическими разновидностями линейных структур типа минеральной или ролдинговой линейности. Ориентация экстенсивной линейности стремится к почти полной коаксиальности с осью X эллипсоида конечной деформации во время действия простого скальвания. Экстенсивная линейность часто расположена приблизительно параллельно к синхроническим осям корбчатых складок.

Развитие экстенсивной линейности, так как и зон скальвания, связано с тектоникой шарьяжей и/или

tectonics. Orientation of trajectories of extensional lineation on structural maps (together with other kinematic indicators) facilitates reconstruction of geometry and evolution of shear zones. Therefore, regardless limitations, the orientation of extensional lineation is one of the basic kinematic indicators, which is used (among other things) for qualification of movements of lithospheric plates – from Proterozoic times till recent movements.

The extensional lineation also occur in Sudety Mountains, where it was hitherto regarded as lineation "type B", i.e. as a lineation developing parallel to the axis "Y" of finite strain ellipsoid. Detailed studies on extensional lineation in different shear zones in Sudety Mts. will probably modify or even reject existing ideas on structural evolution of this eastern part of European Variscides.

сдвигов. Ориентация траектории экстенсивной линейности на структурных картах облегчает восстановление (вместе с другими кинематическими показателями) геометрии и эволюции зон скальвания. Поэтому ориентация экстенсивной линейности, mimo ограничений, является одним из основных кинематических показателей, который используется в частности для определения литосферных плит с протерозоя до современных движений.

Экстенсивная линейность встречается также в Судетах, но там до сих пор считали ее линейностью типа В, т.е. линейностью развивавшуюся параллельно к оси Y эллипсоида конечной деформации. Детальные исследования линейности в зонах скальвания разного типа в Судетах вероятно модифицируют или даже отвергнут существующие до сих пор мнения, касающиеся структурной эволюции этой восточной части средневропейских Варисцид.