

Józef OBERC, Jerzy KOTOWSKI

STOSUNEK B-LINEACJI DO REGIONALNEGO, LOKALNEGO I CZĄSTKOWEGO POLA NAPRĘŻEŃ I SIŁ

(8 fig.)

*Relation of B-lineation to the regional, local and partitive field
of force and strain*

(8 Figs.)

Treść: Przedstawiono zagadnienia rozrzutu B-lineacji w wiązkach fałdów jednofazowych zbudowanych ze skał osadowych, epimetamorficznych i mezozonealnych. Zanalizowano stan naprężeń pól: regionalnego, lokalnego i cząstkowego w oparciu o orientację lineacji. Podano charakterystykę pól sił i stosowanych układów koordynacyjnych.

WSTĘP

Od kilkudziesięciu lat wykorzystuje się orientację przestrzenną lineacji do wytłumaczenia kierunków naprężeń pola sił, w którym lineacja ta powstała. Dla ruchów fałdowych największe znaczenie ma lineacja B. Wykazuje ona, jak ogólnie wiadomo, przebieg równoległy do makrostruktur fałdowych, powstałych w określonej, lecz jednej fazie deformacji. Kierunek fałdów zmienia się jednak w przestrzeni w zależności od zmian kierunków nacisków.

Lokalne odchylenia od generalnych kierunków mogą też być spowodowane przejawami fałdowania dysharmonijnego związanego ze znacznymi różnicami kompetencji.

Kierunek lineacji równoległy do osi struktur fałdowych zmienia się w zależności od zmian ich kierunku. Lokalne odstępstwa od tej zasady są spowodowane dodatkowymi czynnikami jak różnice szybkości ruchu różnych fragmentów jednostki geologicznej, co najczęściej spowodowane jest różną kompetencją warstw i ławic. Pomiary ujawniają więc rozrzut lineacji w znacznym niekiedy zakresie. Wytłumaczenie rozrzutu napotyka niekiedy znaczne trudności, w których wyniku rozważane bywają możliwości wiązania kierunków z osią *b*, innych nawet z osią *a* układu koordynacyjnego. Są wreszcie kierunki pośrednie.

Jeżeli zanalizujemy struktury liniowe w obrębie poszczególnych agregatów ziarn mineralnych bądź podrzędnych fragmentów jednego mezoskopowego fałdu, mogą się pojawić kierunki tego samego wieku nawet prostopadłe do osi większych struktur, co jeszcze bardziej zwiększa rozrzut.

Celem niniejszego artykułu jest zbadanie związku między lineacją a układami koordynacyjnymi dla większych obszarów oraz przedstawienie rozrzutu lineacji, związanego z jednym etapem deformacji w zależności od skali zjawiska.

Postawione w tytule zagadnienie ma nie tylko wielkie znaczenie poznawcze dla wyjaśnienia budowy tektogenów, ale także znaczenie praktyczne przede wszystkim w mechanice górotworu. Zdaniem autorów lineacja stanowi ważny choć dotychczas na ogół pomijany element teorii mechaniki górotworu oraz reologii i wytrzymałości skał.

SKALA POLA SIŁ

Z postawionego na wstępie zagadnienia lokalnych odstępstw od generalnej orientacji lineacji w górotworze wynika, że konieczne jest wydzielenie pod względem zasięgu: regionalnej, lokalnej i cząstkowej orientacji lineacji, a co za tym idzie: *a* — regionalnego pola sił; *b* — lokalnego pola sił; *c* — cząstkowego pola sił (fig. 1a, 1b).

Wymienione pojęcia rozważamy dla określonego czasu geologicznego, a więc dla struktur fałdowych jednofazowych. Traktujemy je jako umowne, ułatwiając one zrozumienie poruszonych w pracy zagadnień.

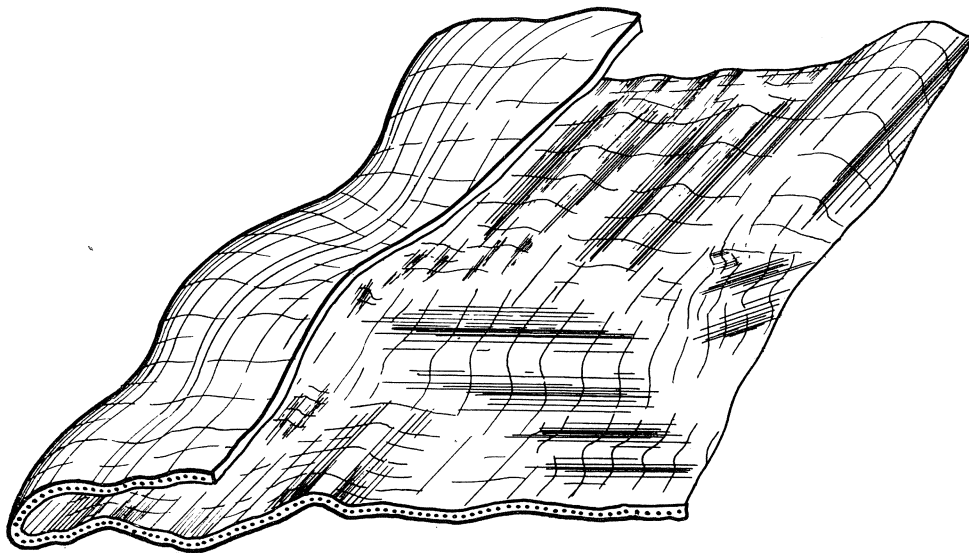


Fig. 1a. Stosunek drugorzędnych (lokalnych) fałdów podłużnych, poprzecznych i diagonalnych do fałdu o zasięgu regionalnym (wyższego rzędu) uwzględniając stosunek innych B-lineacji do siebie

Fig. 1a. Relation of minor (local) longitudinal, transverse and diagonal folds to a fold of regional extent; interrelation of other B-lineations is taken into account

Regionalne pole sił obejmuje w ujęciu autorów artykułu gałąź górotworu (jednofazowego). W tego rodzaju jednostce B-lineacja w ujęciu regionalnym zmienia kierunki w sposób ciągły, zgodnie ze zmianami

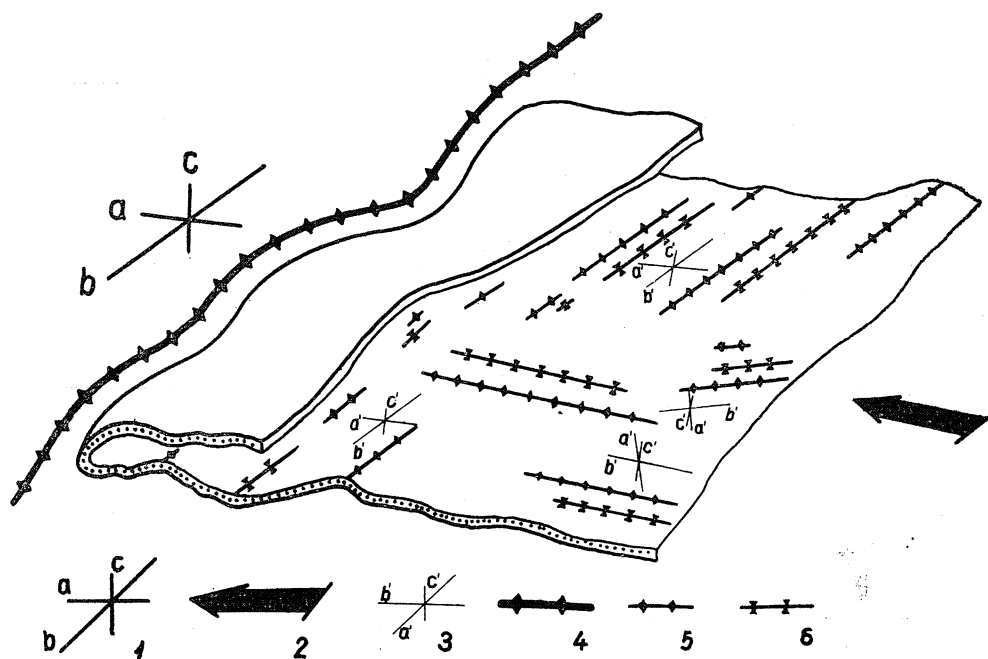


Fig. 1b. Stosunek pól lokalnych do pola regionalnego oparty na B-lineacji. 1 — regionalne pole sił; 2 — regionalny transport tektoniczny; 3 — lokalne pole sił; 4 — kierunek osi jednostki wyższego rzędu (o zasięgu regionalnym); 5 — osie antyklin niższego rzędu (lokalnych); 6 — osie synklin niższego rzędu (lokalnych)

Fig. 1b. Relation of local fields of force to regional field, based on B-lineation. 1 — regional field of force; 2 — regional tectonic transport; 3 — local field of force; 4 — direction of axis major fold (of regional extent); 5 — axes of minor (local) anticlines; 6 — axes of minor (local) synclines

przebiegu osi fałdów. Dla takich jednostek stosowany jest układ koordynacyjny krzywoliniowy. W ramach pola regionalnego zaznaczają się pola lokalne, obejmujące drugorzędne i trzeciorzędne fragmenty gałęzi górotworu. Pola te zorientowane są zgodnie z polem regionalnym bądź w sposób wyraźnie różny od niego.

Lokalne pole sił obejmuje małe fragmenty terenu. Najczęściej są to wąskie strefy, w których widoczne są analogiczne efekty ruchu, inne niż regionalne. Przestrzeń objęta działaniem lokalnego pola sił wynika z badań strukturalnych prowadzonych w skali makro- i mezoskopowej (tab. 1). Szczegółowa analiza materiału terenowego pozwala z dużą dokładnością wydzielić zasięg obszaru, w którym zarejestrowane są efekty głównego naprężenia lokalnego pola sił.

Efekty strukturalne lokalnego pola sił w górotworze nie zawsze po-

krywają się z kierunkiem działania głównych naprężeń regionalnego pola sił, mogą być równoległe, skośne a nawet prostopadłe, o czym będzie mo-

Tabela 1

Skale form tektonicznych i odpowiadające im skale pól sił oraz układy koordynacyjne

Skala form	Wykształcenie form i elementy tektoniczne	Skala pola sił	układ koordynacyjny
mega	fałdowe łańcuchy górskie i tektonogeny syneklizy, anteklizy	skala kontynentu, skala globu (globalne)	prostokątny krzywoliniowy
makro	osie fałdów makroskopowych	regionalne	
mezo	lineacja ziarna zmarszczkowanie budinaz i mezofakdy	lokalne	prostokątny prostoliniowy lub krzywoliniowy
		częsteczkowe	
mikro	mikroelementy liniowe	mikropola	prostokątny prostoliniowy

w odniesieniu do układów koordynacyjnych poszczególnych pól (fig. 3)

Oznaczenia:

$\left. \begin{matrix} a \\ b \\ c \end{matrix} \right\}$	osie koordynat strukturalnych pola regionalnego
$\left. \begin{matrix} a' \\ b' \\ c' \end{matrix} \right\}$	osie koordynat strukturalnych pola lokalnego

wa dalej. Powstałe struktury liniowe, analizowane w skali mezoskopowej zarówno w polu regionalnym, jak i lokalnym są wykształcone niekiedy analogicznie. Stąd też zachodzi możliwość utożsamienia tych struktur, mimo że powstały podczas równowiekowego, lecz innego określonego pola sił (stanu naprężenia). Nierozróżnianie wyżej wymienionych, różnych pod względem warunków i rozprzestrzenienia pól sił, w jakich powstała lineacja i większe jednostki tektoniczne, stwarza możliwość błędnego interpretowania lineacji i wątpliwości czy to jest A czy B-lineacja. Wobec faktu, że na różnych odcinkach formującego się górotworu istnieją różne stany naprężeń, co warunkuje powstanie różnych struktur, które bywają zaliczane przez jednych do B-lineacji, przez innych autorów natomiast utoż-

samiane z A-lineacją, w zależności od tego, w jakiej skali zjawisko to jest rozpatrywane. Trudności występują w tych miejscach, gdzie B-lineacja lokalna ustawiona jest w przybliżeniu prostopadle do B-lineacji powstałej w polu regionalnym.

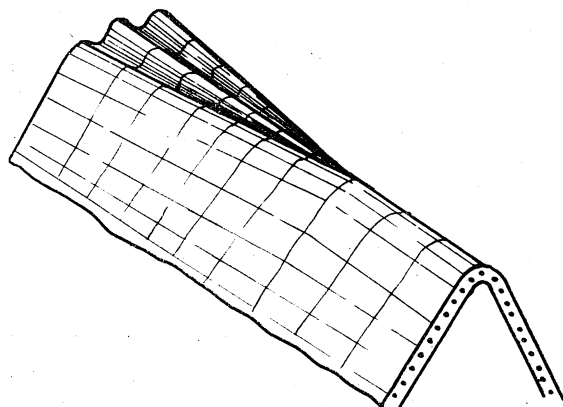


Fig. 2. Wtórne fałdy w obrębie antykliny jako efekt cząstkowego pola sił

Fig. 2. Secondary folds within an anticline as the effect of partitive field of force

Cząstkowe pole sił może być rozpatrywane jedynie w skali mezoskopowej. A zatem podany wyżej zakres determinuje zasięg pola, które można ograniczyć jedynie do niewielkiej odkrywki lub jej fragmentu, próbki skalnej lub fragmentu tej próbki (fig. 2). Cząstkowy układ głównych naprężeń we fragmencie górotworu jest zorientowany w stosunku do powstałych struktur w warunkach pola regionalnego lub lokalnego równolegle, skośnie a nawet prostopadle. Cząstkowe pole sił jest elementem składowym lokalnego pola sił. Analiza geologiczna pozwala stwierdzić, że efektem cząstkowego pola sił jest w głównej mierze translacja intergranularna lub intragranularna względnie pełzanie materiału traktowane zazwyczaj jako płynięcie — w przypadku skał metamorficznych, połączone z rekrytalizacją.

Wymienione trzy zakresy pól nie wyczerpują zagadnienia ich systematyki.

Regionalne pole sił składa się łącznie na pole sił w zakresie kontynentu (lub oceanu), a ta wchodzi w skład pola globalnego dla określonej fazy deformacji, natomiast cząstkowe pola sił składają się z mikropól, których odbiciem strukturalnym jest orientacja poszczególnych ziarn widziana w skali mikroskopowej i przedstawiana na diagramach petrostrukturalnych.

Wymienione w tym akapicie pola sił leżą poza zakresem przedkładanej pracy i dlatego nie będą w niej bliżej rozważane.

Każdy z wymienionych układów naprężeń wynika z pola sił w górotworze. Dla każdego z rodzajów pola sił (regionalny, lokalny i cząstkowy) przyjmowano dotychczas układ prostokątny i prostoliniowy. Taki układ jest jednak dużym uproszczeniem dla pól regionalnych. Praktyka i teoria uczą, że struktury geologiczne zwłaszcza większe należy rozpatrywać w odnie-

sieniu do układu prostokątnego, krzywoliniowego (krzywoosiowy) porównaj tab. 1), który oddaje lepiej sytuację regionalną, a nawet lokalną niż dotychczas stosowany układ współrzędnych.

Układ prostokątny i prostoliniowy można i należy stosować dla pól cząstkowych, a wyjątkowo dla pól o skali większej w przypadkach prostoliniowego przebiegu osi fałdów.

W analogiczny sposób należy rozpatrywać orientację naprężeń dla poszczególnych pól sił. W wyniku powyższej korelacji a przede wszystkim z rodzaju i orientacji przestrzennej struktur liniowych odtwarzamy warunki kinetyczne, w których one powstały.

STOSUNEK ZAKRESU POLA SIŁ DO FORM TEKTONICZNYCH I ICH SKALI

Wymienionym w poprzednich ustępach zakresom pola sił odpowiadają takie efekty jak mezoskopowe formy tektoniczne i zawarte w nich drobne struktury tektoniczne. Poszczególnym grupom elementów tektonicznych odpowiadają układy koordynacyjne. Wzajemne stosunki między tymi pojęciami przedstawia tab. 1. Przeprowadzono w niej klasyfikację znanych i wchodzących tu w rachubę pojęć tektoniki. Szereg rubryk nie wymaga bliższych wyjaśnień, gdyż są zupełnie zrozumiałe w świetle przedstawionego dotychczas materiału. Wyjaśnienia wymagają jedynie relacje między niektórymi skalami obserwacji makro- i mezoskopowych.

Formy makroskopowe, jak wyżej wspomniano, tworzyły się zazwyczaj w polach regionalnych; strukturom mezoskopowym odpowiadają zakresy pól lokalnych bądź cząstkowych: pierwsze — gdy chodzi o strefy tektoniczne, w których elementy liniowe wykazują odstępstwa od planu regionalnego, drugie — jeżeli w obrębie równoległych fałdów o zasięgu regionalnym pojawiają się pojedyncze fałdy o innej niż w całym regionie orientacji osi. Podany przypadek może zaistnieć wtedy, gdy pojawią się kierunki lokalne, niezgodne z regionalnymi, a równoległe do brzegu mas oporowych lub fałdujących. W strefach takich pojawia się lineacja skośna do struktur o orientacji regionalnej.

ANALIZA STANU NAPRĘŻEŃ A UKŁADY KOORDYNACYJNE

Powstanie struktur liniowych między innymi jest efektem określonych naprężeń. Struktury liniowe powstają, jak wykazano wcześniej, w polu regionalnym i cząstkowym. Układy koordynacyjne, do których nawiązujemy badane struktury liniowe, są w polu lokalnym i cząstkowym w obrębie pola regionalnego zorientowane względem siebie równoległe, skośnie lub prostopadle.

Zgodnie z ogólnie przyjmowanymi założeniami rozkładu naprężeń w górotworze, z którymi łączą się przestrzennie struktury liniowe (F a r-

mer, 1968; Gzovsky, 1971; de Sitter 1960; Belousov, Gzovsky, 1964; Ramsay, 1967) naprężenie główne pośrednie σ_2 pokrywa się z kierunkiem B-lineacją i b-koordynata, zaś powierzchnia ab jest wyznaczona przez σ_2 i σ_3 .

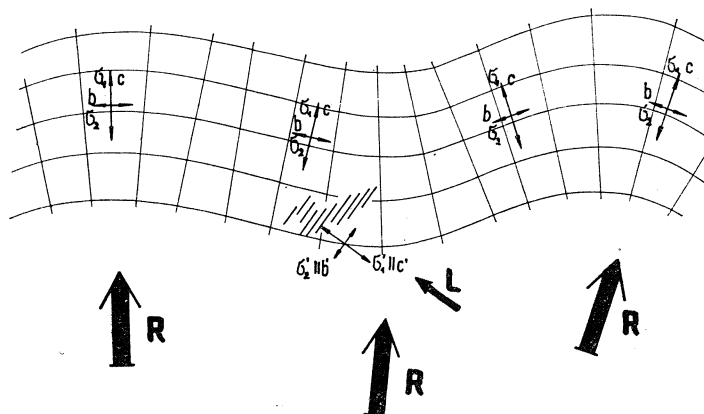


Fig. 3. Schemat orientacji naprężeń głównych widzianych w planie. W dolnej części rysunku orientacja lokalnego układu naprężeń w stosunku do regionalnego. Duże strzałki — generalny kierunek σ_1 (transport regionalny); mała strzałka — kierunek transportu lokalnego σ'_1/c

Fig. 3. Diagram of orientation principal strain seen in plan. In the lower part, orientation of the local strain in relation to the regional system. Large arrows indicate the general direction σ_1 (regional transport); small arrow — the direction of local transport σ'_1/c

Poniżej zostanie przeprowadzona ogólna analiza stanu naprężeń

$$\left. \begin{matrix} a'' \\ b'' \\ c'' \end{matrix} \right\} \text{osie koordynat strukturalnych pola cząstkowego}$$

σ = naprężenie

R, L, C pole o zasięgu regionalnym, lokalnym, cząstkowym.

Dla pola regionalnego w czasie tworzenia się struktur istniały warunki, które można przedstawić w postaci różniczkowego równania równowagi wewnętrznej

$$\left. \begin{aligned} \frac{\delta \sigma_{aa}}{\delta a} + \frac{\delta \sigma_{ab}}{\delta b} + \frac{\delta \sigma_{ac}}{\delta c} + \chi_a &= \rho \ddot{u}_a \\ \frac{\delta \sigma_{ba}}{\delta a} + \frac{\delta \sigma_{bb}}{\delta b} + \frac{\delta \sigma_{bc}}{\delta c} + \chi_b &= \rho \ddot{u}_b \\ \frac{\delta \sigma_{ca}}{\delta a} + \frac{\delta \sigma_{cb}}{\delta b} + \frac{\delta \sigma_{cc}}{\delta c} + \chi_c &= \rho \ddot{u}_c \end{aligned} \right\}$$

gdzie:

$\delta\sigma_{aa}$, $\delta\sigma_{bb}$, $\delta\sigma_{cc}$ — są głównymi normalnymi naprężeniami działającymi na powierzchnię prostopadłą do określonej koordynaty strukturalnej,
 $\delta\sigma_{ab}$, $\delta\sigma_{ac}$, ... $\delta\sigma_{cb}$ — są naprężeniami stycznymi,

ρ — gęstość jednostkowa,

$\ddot{u}$ — przyspieszenie w kierunku koordynat a , b , c ,

X — jednostkowa siła masowa.

Wartości $\rho\ddot{u}_a$, $\rho\ddot{u}_b$ i $\rho\ddot{u}_c$ można w postaci zgeneralizowanej zapisać dla pola regionalnego

$$\left. \begin{matrix} \rho\ddot{u}_a \\ \rho\ddot{u}_b \\ \rho\ddot{u}_c \end{matrix} \right\} R$$

W skróconej postaci różniczkowe równanie równowagi wewnętrznej można zapisać

$$\sigma_{ij,j} + \chi_i = \rho\ddot{u}_i$$

gdzie:

$$i = a, b, c.$$

Przyjmując postać równania dla pola regionalnego można podać::

$$\left. \begin{matrix} \rho\ddot{u}_a \\ \rho\ddot{u}_b \\ \rho\ddot{u}_c \end{matrix} \right\} R$$

W analogiczny sposób można przedstawić formułkę dla pola o zasięgu lokalnym

$$\left. \begin{matrix} \rho\ddot{u}'_a \\ \rho\ddot{u}'_b \\ \rho\ddot{u}'_c \end{matrix} \right\} L$$

i cząstkowym

$$\left. \begin{matrix} \rho\ddot{u}''_a \\ \rho\ddot{u}''_b \\ \rho\ddot{u}''_c \end{matrix} \right\} C$$

A zatem istnieją następujące możliwości orientacji względem siebie poszczególnych naprężeń i układów koordynacyjnych: —

- | | |
|--------------------------------|----------------------------|
| 1. $L \parallel L \parallel C$ | 6. $R \wedge L \perp C$ |
| 2. $L \parallel L \wedge C$ | 7. $R \perp L \parallel C$ |
| 3. $R \parallel L \perp C$ | 8. $R \perp L \wedge C$ |
| 4. $R \wedge L \parallel C$ | 9. $R \perp L \perp C$ |
| 5. $R \wedge L \wedge C$ | |

Podane wyżej 9 podstawowych przypadków orientacji przestrzennej poszczególnych układów pól oraz wzajemne stosunki między tymi przypadkami ma potwierdzenie w przykładach terenowych, szczególnie w se-riach metamorficznych.

Podane wyżej ogólne zapisy należy rozumieć jako istnienie trzech ro-dzajów pól różnych pod względem zasięgu. W warunkach terenowych nie zawsze spotykamy efekty wpływu poszczególnych pól.

B-LINEACJA A SKALA POLA SIŁ

Zgodnie z ogólnie przyjmowaną definicją (Mąska, 1954, s. 26); Cloos, 1946, s. 12; Štekel i inni, 1968, s. 62; Oberc, Kotowski, 1971a, s. 535) za *B*-lineację tektoniczną uważa się takie struktury linijne, których orientacja przestrzenna jest równoległa lub prawie równoległa do osi dużych fałdów (makroskopowych) powstałych w tej samej fazie tektonicznej.

Elementy linijne oznaczamy literą *B*. Natomiast różnowiekowe, wy-kształcone na jednym terenie lineacje określa się symbolem B_1 , B_2 i B_3 przy czym wyższe cyfry oznaczają *B*-lineacje młodsze; (Dennis, 1967; Behr, 1965, s. 177; Gierwielaniec, 1970, s. 3; Gorczyca-Skałowa, 1967, s. 33; Grocholski, 1967, s. 214, 1966, s. 664; Hills, 1963; Kotowski, 1971b, s. 76; Mąska, 1954, s. 164; Schroeder, 1958, s. 15; Smulikowski, 1967, s. 35; Teisseyre, 1967, s. 28, 1968, s. 18).

Istnieją też oznaczenia lineacji *B*, w których wyróżnia się fałdy (*Bf*) i lineacje ziarna (*Bg*) (Oberc, Kotowski, 1969; Oberc, 1966). Inni autorzy określają fałdy symbolem *F*, *f* a lineacje ziarna symbolem *L*, *l* (Ramsay, 1967, s. 446; Baranowski, Haydukiewicz, 1970, s. 45; Teisseyre, 1971, s. 99 i inni).

W regionalnym polu sił powstaje lineacja ziarna analogiczna jak w lo-kałnym polu sił w określonych skałach i określonych warunkach. W tych przypadkach nie różni się ona pod względem asocjacji form mineralnych, rodzaju struktury, morfologii elementów liniowych i anatomii budowy we-wnętrznej.

Analogiczne wykształcenie struktur powstałych w polach regional-nych i lokalnych jest oprócz materiału skalnego spowodowane zbliżony-mi warunkami kinetycznymi. Inną sprawą jest przestrzenna orienta-cja względem siebie układów naprężeń normalnych i stycznych dla re-gionalnego i lokalnego pola sił. Zmiany układu naprężeń w górotworze wywołane są m. in. obecnością obcych sztywnych mas różnej wielkości, które powodują, że fałdujący się górotwór opływa je. W ich bezpośred-nim sąsiedztwie zmienia się układ naprężeń, dzięki czemu pojawiają się odstępstwa od regionalnej orientacji struktur liniowych, przyporządko-wanych regionalnemu polu sił.

Mimo istnienia różnie zorientowanych pól sił różnej skali analizowana *B*-lineacja wykazuje charakterystyczną regionalną orientację. Kierunek *B*-lineacji w skali regionalnej wykazuje słaby rozrzut, zachowując na różnych odcinkach stałą orientację względem charakterystycznych form jak spękania skalne a często i żyły określonego systemu.

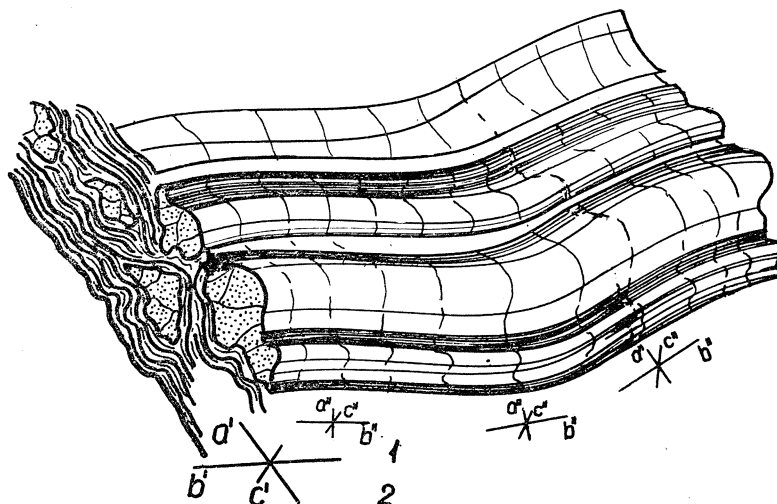


Fig. 4. Lineacja odpowiadająca polu cząstkowemu (1) na tle pola lokalnego (2)

Fig. 4. Lination corresponding to partitive field (1) related to local field (2)

W poszczególnych polach o lokalnym zasięgu *B*-lineacja może wykazywać stałą lub prawie stałą orientację przestrzenną. Interesują nas jednak przede wszystkim przypadki występowania w poszczególnych polach *B*-lineacji różnie względem siebie zorientowanej.

Lineacja w polu cząstkowym (fig. 4) tworzy się w bardzo skomplikowanych warunkach kinetycznych — z reguły w zależności od właściwości materiału skalnego. W materiale niekompetentnym są rejestrowane niemal każde zmiany naprężeń. Jako wynik tych zmian powstają różnie zorientowane struktury linijne. Takie sytuacje powodują „dezorientację” badacza w kwestii zaliczenia poszczególnych systemów (kierunków). Wynikają dyskusje, czy mamy tu do czynienia z *A*-lineacją i *B*-lineacją odnoszoną do pola regionalnego. Tymczasem chodzi tu o *B*-lineacje lokalne.

PRZYCZYNY ROZRZUTU *B*-LINEACJI W SKALI REGIONALNEJ

Rozrzut *B*-lineacji tektonicznej w skali regionalnej jest zależny od szeregu czynników. Jednym z najważniejszych jest głębokość, na jakiej odbywa się fałdowanie. Z tego też względu autorzy omawiają kolejno przyczyny rozrzutu *B*-lineacji w skałach nie zmienionych, w skałach powstałych w płytkich strefach metamorfizmu oraz w jego strefach głębszych.

PRZYCZYNY ROZRZUTU B-LINEACJI W SERIACH OSADOWYCH

W seriach osadowych B-lineacja tektoniczna jest mało zróżnicowana pod względem form. Reprezentują ją osie drobnych fałdów, budinaż i osie beta. Charakter tych struktur jest tu w dużym stopniu uzależniony od wykształcenia litologicznego skały przede wszystkim, a między innymi także od kompetencji. Lineacja rekrytalizacyjna nie była tu opisywana. Należy jednak oczekiwać, że badacze zauważą tego rodzaju lineację (niektóre wapienie i skały solne), przy czym będzie ona składała się z minerałów powstałych przy procesie diagenety parakinematycznej (np. hydro-miki, serycyt). Zagadnienie lineacji rekrytalizacyjnej w seriach solnych nie jest dotychczas bliżej poznane.

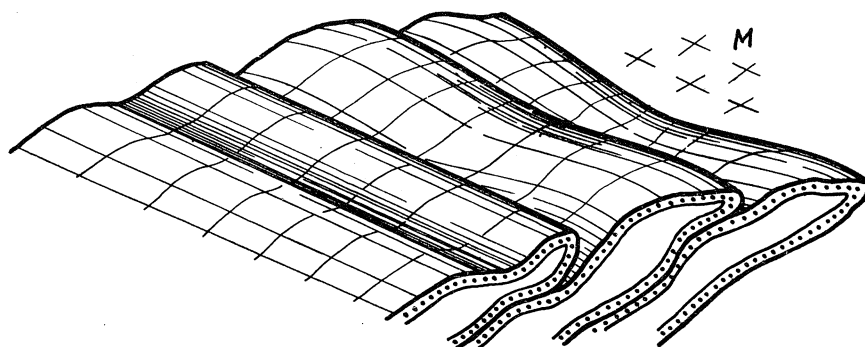


Fig. 5. Zmiana wpływu masy oporowej (M) na zmiany kierunku B-lineacji (osie anty-klin) w zależności od odległości od masy oporowej

Fig. 5. The effect of resistance mass (F) on changes in the direction of B-lineation (axes of anticlines) depending on the distance from the massif

Cechą charakterystyczną fałdowania serii osadowych jest względnie małe ciśnienie nadkładu. Przy nacisku stycznym serie skalne względnie łatwo przemieszczają się w kierunku najmniejszego ciśnienia i są wypychane z głębi ku górze. W tych warunkach wchodzi w rachubę znaczne różnice wartości sił wypadkowych, dzięki czemu powstałe wcześniej lineacje pochodzenia osadowego doznają znacznego rozrzutu. Rozrzut ten powodują takie czynniki jak: pojawienie się lokalnych elewacji podłoża, na których struktury fałdowe są cofnięte (fig. 5), podczas gdy w depresji wysuwają się w kierunku wergencji. Elewacje i depresje są związane między innymi z pojawieniem się mas oporowych.

Inną przyczyną rozrzutu jest zmieniająca się kompetencja warstw. Zmiany kompetencji warstw są między innymi przyczyną ruchów dyferencjalnych międzyławicowych bądź międzywarstwowych, przy których warstwy kompetentne na różnych odcinkach swego występowania wykazują przy fałdowaniu różne szybkości. Dzięki temu w wyniku siły wypadkowej powstają fałdy o zmiennych kierunkach osi w polach lokalnych.

Innym ważnym czynnikiem wpływającym na rozrzut lineacji w skałach osadowych jest zmieniający się plan deformacji (plan strukturalny) w ewolucji poszczególnych makrostruktur. Ewolucja ta nie ma znaczenia dla rozrzutu, gdy nie wchodzi w rachubę czynniki wyżej rozpatrywane. Na każdym etapie bowiem i na znacznych przestrzeniach osie drobnych fałdów lub budinażu przebiegałyby prostolinijnie i układałyby się równolegle do osi wielkich struktur. Ponieważ jednak często po powstaniu lineacji ruch trwa nadal w warunkach zmieniających się na drodze ruchu oporów, powstała wcześniej lineacja podlega reorientacji w ramach tej samej fazy górotwórczej. Dalszemu etapowi ewolucji struktur w skali regionalnej towarzyszy powstanie nowych lineacji zależnych od lokalnych sił wypadkowych. W rezultacie, dzisiaj obserwowanym jednofazowym makrostrukturom towarzyszy lineacja wykazująca rozrzut, powstała w różnym czasie, w różnych etapach jednej fazy tektonicznej.

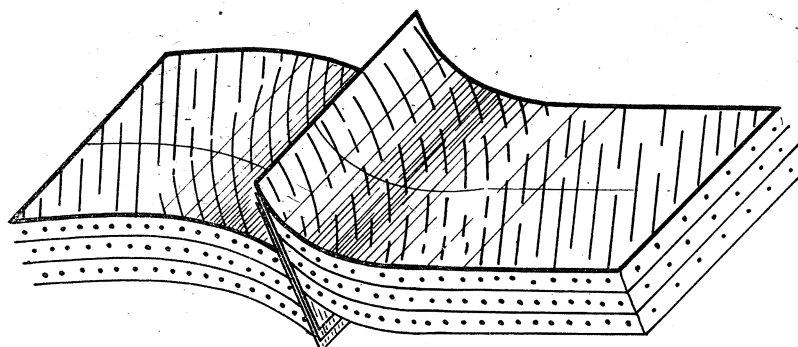


Fig. 6. Ciągnięcie warstw w sąsiedztwie uskoku inwersyjnego równoczesnego z fałdowaniem. Wcześniej (lecz w obrębie tej samej fazy) powstała B-lineacja ulega reorientacji w pionie i w poziomie

Fig. 6. Drag effect in the vicinity of a reverse fault which is contemporary with folding. Earlier (but in the same phase) created B-lineation is reoriented both vertically and horizontally

Z powyższych uwag wynika wniosek, że rozrzut B-lineacji pochodzący z jednej fazy tektonicznej jest tym większy, im dłużej trwa ruch po powstaniu najwcześniejszej lineacji. Inaczej rozumując jest on tym większy, im większa jest amplituda przemieszczeń poziomych odnośnych fragmentów struktur fałdowych. Na znacznym bowiem odcinku przemieszczeń poziomych jest szansa na pojawienie się dodatkowych elementów powodujących rozrzut powstałej wcześniej B-lineacji. Wynika z tego też, że w fałdach autochtonicznych zakorzenionych na miejscu, rozrzut B-lineacji jest mniejszy niż w elementach o znacznej amplitudzie przemieszczeń poziomych.

Za inną przyczynę rozrzutu B-lineacji w skałach osadowych należy uznać ciągnięcie warstw a tym samym lineacji (drobnych struktur fałdowych) w sąsiedztwie uskoku lub stref uskoku (fig. 6). Powstają lo-

kalne pola sił, dzięki którym wyginają się struktury linijne w obrębie skrzydła wykazującego ruch wolniejszy w kierunku skrzydła uskoku poruszającego się szybciej albo wypiętrzającego się ku górze. Reorientacja będzie więc pozioma albo pionowa a najczęściej jedna i druga równocześnie.

W rozważaniach nad przyczynami rozrzutu *B*-lineacji tektonicznej w skałach nieprzeobrażonych pomijamy takie specjalne przypadki deformacji tektonicznej jak odkształcenia glacitektoniczne, zjawiska tektoniki spływowej oraz fałdy typu diapirów związane w mniejszym stopniu z naciskami stycznymi a przede wszystkim z wyciskaniem plastycznych mas z głębi.

PRZYCZYNY ROZRZUTU *B*-LINEACJI W SERIACH EPIMETAMORFICZNYCH

W fałdowaniu w warunkach płytkiej metamorfozy biorą udział serie skalne, które w ramach tej samej fazy przeszły już fałdowanie w warunkach diagenety (skały osadowe). Wobec tego lineacja, która tam powstała i doznała rozrzutu, bierze udział w fałdowaniu w warunkach epizonalnych ulegając jedynie dalszemu rozrzutowi. Skały podlegają przy tym rekrytalizacji, która nie prowadzi do zaniku lineacji z czasów fałdowania w warunkach diagenety. Ponieważ fałdowanie odbywa się przy wyższych niż poprzednio opisanych ciśnieniach nadkładu, zmniejsza się możliwość rozrzutu nowo powstałej *B*-lineacji, spowodowanego zmianami grubości nadkładu. Równocześnie silne ciśnienie tangencjalne jest przyczyną powstania wielkiej ilości i różnorodności drobnych struktur linijnych, do których prócz fałdów i budinażu należy zmarszczkowanie, lineacja rekrytalizacyjna, struktury mulinowe a także lineacja powstała z przecięcia różnych powierzchni *S* związanych z jedną fazą tektogeniczną. Z uwagi na znaczne amplitudy przemieszczeń, rozrzut drobnych struktur powstałych na początku trwania tego procesu jest znaczny.

Rozrzut *B*-lineacji w omawianych warunkach jej powstania jest sprawą skomplikowaną i składają się nań dwie przyczyny, z których powinniśmy sobie zdawać sprawę i umieć je od siebie odróżnić.

- 1 — Rozrzut związany z fazą tektogeniczną, w czasie której zachodziła epimetamorfoza.
- 2 — Rozrzut w czasie późniejszym spowodowany czynnikami geologicznymi w młodszych fazach fałdowania i w fazie wypiętrzenia tych serii do powierzchni ziemi, gdzie dziś badamy orientację *B*-lineacji. Tym zagadnieniem nie zajmujemy się szczegółowiej, gdyż jak zaznaczyliśmy na początku pracy, dotyczy ona wyłącznie struktur tektonicznych jednofazowych bez późniejszej przebudowy.

Niewątpliwie czynnikiem zmniejszającym rozrzut jest głębokość fałdowania większa niż w warunkach diagenety. Utrzymują się przyczyny

wymienione w poprzednim ustępie jak: dysharmonia związana z różnicami kompetencji warstw występujących nad sobą, zmiana szybkości ruchu określonego ogniwa litologicznego na różnych odcinkach jego zasięgu, obecność uskoków oraz, co wyżej podkreślono, znaczne amplitudy przesunięć.

W seriach epizonalnych występują skały łupkowe typu fyllitów. Są one plastyczne, wskutek czego reagują powstaniem coraz to nowych lineacji i reorientacji wcześniej powstałych lineacji w ramach jednej fazy tektonicznej.

Obserwuje się tu dużą różnorodność lineacji i nakładania się lineacji w ramach jednej fazy, na różnych jej etapach i przy polach lokalnych i cząstkowych.

Nie można tylko na podstawie krzyżowania się różnych lineacji wyznaczać w tych przypadkach większej ilości faz tektogenicznych.

ROZRZUT B-LINEACJI W GŁĘBSZYCH STREFACH

W strefach głębszych, poczynając od mezozony, przeobrażeniom podlegają serie skalne, które uprzednio lecz w ramach tej samej fazy przeszły fałdowanie w warunkach diagenety i epizonalnych. Ciśnienie nadkładu jest wysokie, ustępując ciągle jeszcze miejsca ciśnieniu stycznemu. W głębszych partiach omówionej strefy (Z-1) (Jung, Roques, 1952) wchodzi w rachubę nowy czynnik — produkty parakinematycznej granityzacji.

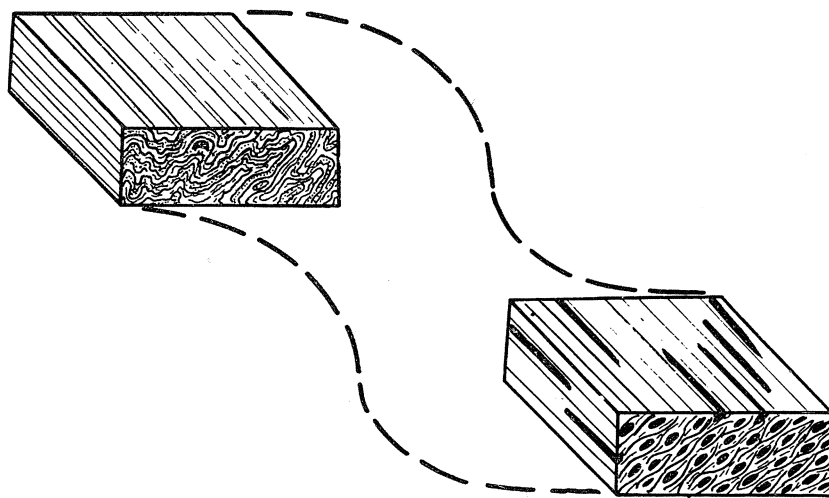


Fig. 7. Zmiany zachodzące w B-lineacji między epizoną a głębszą mezozoną po parakinematycznej granityzacji

Fig. 7. Changes in the form of B-lineation between epizone and mesozone after parakinematic granitization

Powstanie grubych stref gnejsów i zanik różnokierunkowych lineacji w łupkach, których kosztem powstają gnejsy, które w stosunku do łupków wykazują większą kompetencję. Tego rodzaju pakiety gnejsów wykazują samodzielność i bywają odkłuwane od podłoża łupkowego, nad którym przemieszczają się dysharmonijnie i samodzielnie, deformując w dalszym ciągu niżejległe łupki.

Rozrzut *B*-lineacji zmniejsza się z dwóch powodów:

- a) z powodu głębszej strefy fałdowania, gdzie warunki pola sił ulegają ujednoliceniu,
- b) część wcześniej (w ramach tej samej fazy) powstałych *B*-lineacji ulega zniszczeniu wskutek rekrytalizacji: zmniejszeniu ulega więc częściowo rozrzut uzyskany w wyższych strefach fałdowania (fig. 7) i różnorodność form liniowych (fig. 7).

W najgłębszych strefach metamorfizmu, gdzie skały ulegają — zwłaszcza po ustaniu stressu — uplastycznieniu, powstają fałdy migmatyczne o znacznym rozrzucie. Czynnika tego jednak nie rozpatrujemy bliżej na tym miejscu.

WIĄZANIE LINEACJI Z OSIAMI UKŁADU KOORDYNACYJNEGO

W geologii strukturalnej przyjęło się wiązanie lineacji z osiami układu koordynacyjnego. Dla lineacji zgodnej z osiami makrostruktur fałdowych przyjmuje się za Cloosem (1946) symbol *b*, choć słuszniej jest stosowanie symbolu *B*. Ta lineacja jest przedmiotem niniejszej pracy. Autorzy, którzy piszą o lineacji, nie określając jej dodatkowym symbolem mają zawsze na myśli lineację zgodną z osiami makrostruktur fałdowych. Natomiast lineacja na powierzchniach przemieszczeń ślizgowych zgodnych z kierunkiem ruchu, określana jest symbolem *A*. Jej zagadnienie nie jest przedmiotem przedkładanej pracy.

W świetle przedstawionego powyżej rozrzutu różnych *B*-lineacji na małych przestrzeniach nawet w tektonach jednofazowych, niektórzy autorzy stanęli wobec trudności wiązania stwierdzonych lineacji z określonym polem sił; zarzucają przy tym symbol *B* dla określenia lineacji, a stosują symbol (*l*, *L*) dla lineacji ziarna oraz (*f*, *F*) dla osi fałdów. Wspomniane trudności wynikają z przyjmowanego jednego trójosiowego stanu naprężeń dla wszystkich lineacji nawet takich, które ustawione są pod kątem względem siebie.

1. Określenie wszystkich lineacji jednym symbolem nie jest uzasadnione. Rysy ślizgowe, które są lineacją *A* mają inne znaczenie niż np. lineacja rekrytalizacyjna (*B*), wobec czego i ich odróżnienie symbolami jest niezbędne.

2. Do lineacji dobieramy osie układu koordynacyjnego. Odpowiednio zorientowany układ pomaga nam w określeniu pola sił regionalnego, lo-

kalnego i cząstkowego. Nie można sobie wyobrazić nauki o polu bez układu odniesienia. Nieuwzględnianie układu odniesienia z określonym znaczeniem poszczególnych osi wprowadza dezorientację w rozważaniach nad kinematyką deformacji zarówno ciągłych, jak nieciągłych.

3. Stosowanie układu odniesienia dla struktur liniowych pozwala na określenie stosunku form nieciągłych, które najczęściej mają określoną i stałą pozycję w stosunku do osi struktur fałdowych, na które są nałożone.

4. Posługiwanie się układem koordynacyjnym (wyznaczony na podstawie strukturalno-teksturalnej cech skały) ma też duże znaczenie w geologii stosowanej, przy badaniu wytrzymałości skał i ich ścieralności. Niestosowanie go prowadzi do tego, że dane wynikające z pomiarów mają znaczenie losowe.

WNIOSKI

Z przedstawionej analizy zagadnienia *B*-lineacji w jednofazowych budowach fałdowych wynikają następujące wnioski:

1. Z wyjątkiem rys ślizgowych (*A*-lineacja) i spokrewnionych z nimi stylolitów tektonicznych, każda parakinematyczna lineacja bez względu na to, pod jakim kątem jest ustawiona względem innych lineacji z tej samej fazy — jest lineacją *B*, którą musimy rozważać w odpowiedniej skali pola sił.

2. Ustawienie pod kątem kilku *B*-lineacji należących do jednej fazy tektogenicznej wymaga przyjęcia zmieniającego się w czasie (trwania tej fazy) układu koordynacyjnego dynamicznego (kinematycznego). Pojęciem tym posługuje się *G z o v s k y* (1971, s. 92). Autorzy rozumują to w ten sposób, że każdej lineacji należy przyporządkować oddzielny układ koordynacyjny. Układ kinetyczny przeciwstawiają autorzy układowi statycznemu, który oparty jest na dzisiejszej orientacji przestrzennej lineacji. Tak rozumował w swych pracach *S a n d e r* (1950) pojęcie układu koordynacyjnego.

3. Tworzące się po sobie w procesie fałdowania lineacje są w każdym punkcie prostopadłe lub w przybliżeniu prostopadłe do kierunku nacisku w tym i cząstkowego panującego w odnośnym momencie czasu geologicznego.

4. Orientacja lineacji w każdym punkcie winna być wyjaśniona w ramach pola określonej skały regionalnego, lokalnego i cząstkowego z uwzględnieniem stopnia reorientacji w czasie późniejszych deformacji (co nie zawsze jest sprawą prostą dla pola określonej skały).

5. Identyfikacja *B*-lineacji jest w ramach terenu badań oparta na jej cechach morfologicznych, mineralogicznych i wewnętrznej anatomii.

6. Autorzy zalecają oddzielne analizowanie orientacji, lineacji i historii orientacji różnie wykształconych lineacji, a na różnych odcinkach

terenu porównywanie jedynie lineacji wykształconej identycznie. W każdym punkcie konieczne jest określenie stosunku przestrzennego różnych lineacji do siebie. Z takiej analizy geometrycznej lineacji wynika orientacja pola sił w odpowiednich skalach: regionalnej, lokalnej i cząstkowej.

7. Każdej lineacji odpowiada określone ustawienie osi układu koordynacyjnego statycznego. Dla pola regionalnego układ jest zgeneralizowany (nie uwzględnia pól lokalnych), a jest prostokątny krzywoosiowy, przy

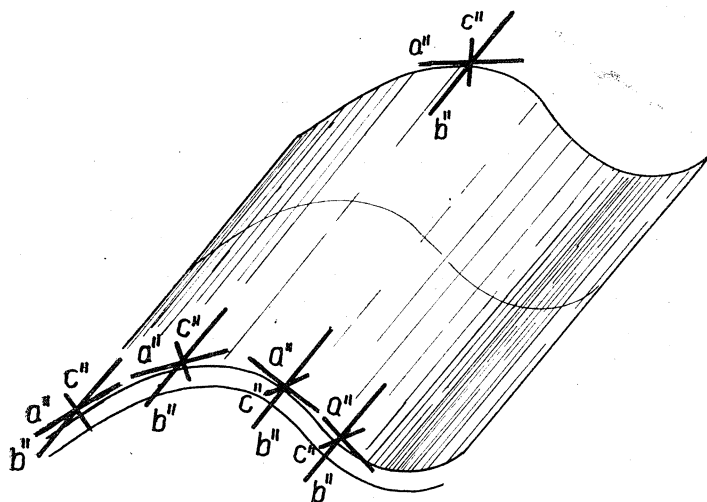


Fig. 8. Orientacja układu koordynacyjnego w ramach pola cząstkowego

Fig. 8. Orientation of the coordinate system within partitive field

czym oś a jest ustawiona poziomo lub w przybliżeniu poziomo (fig. 1b).

Dla pól lokalnych układ jest prostokątny i prostoosiowy (prostoliniijny), a oś a jest pozioma lub prawie pozioma (fig. 1b), wyłącznie w strefach przegubów fałdów; na skrzydłach oś a jest nachylona zgodnie z upadkiem powierzchni zafałdowanej.

Podobnie dla poszczególnych małych jednostek, którym odpowiada pole cząstkowe, układ jest prostokątny i prostoosiowy (prostoliniijny) z tym, że oś a jest pozioma tylko w przegubach fałdów, a na skrzydłach jest nachylona (układ koordynacyjny diagonalny) (fig. 8).

Powyższe zasady odnoszą się do fałdów o osi b poziomej lub zbliżonej do poziomej; dla fałdów o nachylonych osiach należy przestrzegać zasady prostokątności osi układu w miejscu ich przecięcia.

J. Oberc

Instytut Geologii Uniwersytetu Wrocławskiego
ul. Cybulskiego 30, 50-205 Wrocław

J. Kotowski

Instytut Geotechniki Politechniki Wrocławskiej
pl. Grunwaldzki 9, 50-377 Wrocław

Maszynopis nadesłano VII 1975,
przyjęto do druku I 1976

WYKAZ LITERATURY
REFERENCES

- Baranowski Z., Haydukiewicz A. (1970), Preliminary Note on Structural Research in the Northern Trunk of the Góry Kaczawskie (Western Sudetes). *Bull. Acad. Pol. Sci. Sér. des sci. géol. et. géogr.* 18, 1, Warszawa.
- Behr H. J. (1965), Zur Methodik tektonischer Forschung im kristallinen Grundgebirge. *Ber. geol. Ges. DDR*, 10, 2, p. 163—172, Berlin.
- Billings M. P. (1965), Structural Geology (wydanie drugie) Englewood Cliffs. N. J. Prentice — Hall, INC.
- Cloos E. (1946), Lineation a critical review and annotated bibliography. *Geol. Soc. of America. Memoir* 18.
- Dennis J. (1967), International tectonic dictionary. English terminology. Tulsa, Oklahoma.
- De Sitter L. U. (1964), Structural geology (wydanie drugie) Mc Graw-Hill Book Company.
- Farmer I. W. (1968), Engineering Properties of Rocks. *E. F. N. SPON LTD.* London.
- Gierwielanec J. (1970), Uwagi o tektonice Ładka-Zdroju. *Pr. Nauk. Inst. Geot. Rol. Wrocław., Studia i Mat.* 5 p. 3—21, Wrocław.
- Gorczyca-Skałowa J. (1967), Wycieczka A, punkt 2. *Przewodnik XL Zjazdu Pow. Tow. Geol.-Zgorzelec* p. 33—34, Wyd. Geol., Warszawa.
- Grocholski W. (1967), Tektonika Gór Sowich. *Geol. sudet.*, 3, p. 181—249, Warszawa.
- Grocholski W. (1969), Mezostruktury obszaru gnejsów sowiogórskich na Przedgórzu Sudeckim, *Rocz. Pol. Tow. Geol.* 39, 4, p. 651—674, Kraków.
- Hills E. S. (1963), Elements of Structural Geology, London.
- Jung J., Roques M. (1952), Introduction à l'étude zonéographique des formations cristallophylliennes. *Bul. geol. carte France*, 50, 235, p. 1—62.
- Kotowski J. (1971a), Analiza mezoskopowa lineacji biotyty w gnejsach izerskich. *Rocz. Pol. Tow. Geol.* 41, 4, p. 553—563, Kraków.
- Kotowski J. (1971b), Geologia krystaliniku izerskiego okolicy Gryfowa Śląskiego. *Inst. Geol., Biul.* 253, Warszawa.
- Máška M. (1954), K tektonické analýze krystalinika. *Naklad. Československé Akad. Ved*, Praha.
- Oberc J., Kotowski J. (1969), Orientacja mezoskopowych enklaw autochtonicznych i struktury szkieletowe w granicie rumburskim. *Inst. Geol., Biul.* 230, p. 5—166, Warszawa.
- Oberc J., Kotowski J. (1971a), Podział B lineacji tektonicznej na podstawie badań w Sudetach. *Rocz. Pol. Tow. Geol.* 41, 4, p. 533—552, Kraków.
- Oberc J., Kotowski J. (1971b), Parakinematyczna B-lineacja mezoskopowa ziarn mineralnych. *Rocz. Pol. Tow. Geol.* 41, 4, p. 603—620, Kraków.
- Ramsay J. (1967), Folding and Fracturing of rocks. Mc Graw-Hill Book Company.
- Sander B. (1950), Einführung in die Gefügekunde der geologischen Körper. Wien.
- Schroeder E. (1958), Prävariszischer Magmatismus und Tektonik in den Sattelzonen Ostthuringens. *Abh. deutsh. Akad. Wiss. Berlin*, p. 5—60.
- Smulikowski W. (1967), Wycieczka A, punkt 3, *Przewodnik XL Zjazdu Pol. Tow. Geol. — Zgorzelec*, p. 34—36, Wyd. Geol., Warszawa.
- Štelcl J., Beneš K., Pták J. (1967, 1968), Úvod do studia drobné tektoniky a petrotektoniky. I-Základní pojmy nauky o vnitřní stavbě (sestavění) geologických lés, t. VIII. II — Metody a jejich aplikace, t. IX Brno Folia, Facultatis scientiarum naturalium Universitatis Purkynianae Brunensis.

- Teisseyre H. (1967), Najważniejsze zagadnienia geologii podstawowej w Górach Kaczawskich. *Przewodnik XL Zjazdu Pol. Tow. Geol.* — Zgorzelec, p. 11—30, Wyd. Geol. Warszawa.
- Teisseyre H. (1968), Serie metamorficzne Sudetów. Uwagi o stratygrafii, następstwie i wieku deformacji oraz metodach badawczych. *Geol. sudet.*, 4, p. 7—45, Warszawa.
- Teisseyre H. (1971), Zagadnienie analizy strukturalnej w Sudetach jej cele i metodyka. *Rocz. Pol. Tow. Geol.* 41, 1, p. 93—118, Kraków.
- Turner F. J., Weiss L. E. (1963), Structural analysis of metamorphic tectonites. Mc Graw-Hill Book Company.
- Belousov V. V., Gzovsky M. V. — Белоусов В. В., Гзовский М. В. (1964) — Экспериментальная тектоника. Издатель. „НЕДРА” Москва.
- Gzovsky M. V. — Гзовский М. В. (1971). Математика в геотектонике. Издатель „НЕДРА” Москва.

SUMMARY

According to the authors, the general direction of B-lineation (lineation of grains, crenulation, fold axes, boudinage, and others) is associated with the regional field of force, the effect of which is a branch of folded zone of the tectogene. Within the regional field some local fields may appear, comprising minor second- and third-rate fragments of the branch with different orientation, i.e. represented by different directions of B-lineation. If the latter is perpendicular, or nearly perpendicular, to the regional B-lineation, it is sometimes wrongly defined as A-lineation. The partitive field of force is examined here on the basis of mesoscopic tectonic structures.

Strain has been related to the axes of the coordinate system of fields of different scale: regional (a , b , c), local (a' , b' , c') and partitive (a'' , b'' , c''). As appears from the analysis, there are 9 fundamental cases of spatial orientation of fields and their interrelations. When considering the causes of dispersion of B-lineation associated with a single tectogenic phase, sedimentary rocks, epizonal and mesozonal metamorphites have been discussed separately.

In sedimentary rocks, B-lineation is represented by axes of minor folds, boudinage, beta axes, and others. Local elevation and depressions, as well as the effect of resistance and folding massifs, changes in the structural plan during a single phase, considerable differences in the value of the resultant forces, and, finally, competency are regarded as responsible for dispersion. Long duration of folding and the amplitude of horizontal displacements after the creation of B-lineation, due to which B-lineation is further reoriented, as well as the depth of folding are of great importance for the dispersion.

In epizonal rocks, the process of folding that began during diagenesis is continued. Due to greater load pressure, the new-formed types

of B-lineation (recrystallization-lineation, crenulation, beta axes, etc.) show smaller dispersion than under the diagenetic conditions. Disharmonic folding caused by changes in competency and displacement rate, particularly in schists, as well as greater amplitudes of horizontal overthrusts are responsible for the dispersion of pre-existing lineation.

In mesozonal rocks, especially in their deeper parts (Z-1 zone), within thicker gneiss plates, some earlier deformations on a micro- and meso-scale and the associated lineations disappear, due to which their dispersion is lesser. An increase in the competency differences gives rise to new lineations in incompetent series. Their dispersion is not significant because, the field of force is uniform in deeper zones of folding.

In conclusions, the problem of mutual relations between lineations and coordinate system has been discussed and new suggestions given. All the lineations, except for A-lineation, are considered as the b axis for the particular type of lineation and for the definite point of time at which it is formed. If the coordinate system changes from point to point in time, it is the "kinetic coordinate system" (G z o w s k y, 1971). The static coordinate system refers to the present day spatial orientation of lineations. In structural analysis, only analogous lineations identified on the basis of their morphological and mineralogical features, their genesis and internal anatomy may be compared. In every point of the investigated series it is necessary to determine the interrelation between time and space, which defines the extent of local and partitive fields as related to the regional field. The coordinate system for the regional field is rectangular and curvial, with the a axis horizontal. For local fields the system is rectangular and rectaxial, with the a axis horizontal or nearly horizontal only in the hinge zones; on the limbs the a axis is inclined concordantly with the dip of the folded surface. Similarly, for partitive fields the coordinate system is rectangular and rectaxial, with the a axis horizontal in the hinges of anticlines and/or synclines, and inclined on the limbs (diagonal coordinate system). The above principles are valid for folds with the b axis horizontal or nearly horizontal. For folds with inclined axes, appropriate corrections must be introduced in which the principles of perpendicularity of the axes in the point of their intersection will be observed.

Józef Oberc

University of Wrocław, Institute of Geology

ul. Cybulskiego 30, 50-205 Wrocław

Jerzy Kotowski

Engineering School of Wrocław, Institute of Geotechnology

pl. Grunwaldzki 9, 50-377 Wrocław