

ANALIZA TEKTONICZNYCH PÓL NAPRĘŻEŃ JAKO KRYTERIUM POSZUKIWAWCZE

UKD 561.24.053:531.252''313'':550.8:[553.3/.9+553.061+622.27]

Tektoniczne pola naprężeń to przestrzenne układy sił wewnętrznych, wywiązujących się w skorupie ziemskiej pod wpływem oddziaływań tektonicznych, przy nieuchronnym udziale siły przyciągania ziemskiego. Naprężenie jest wielkością tensorową, stąd też dla pełnej charakterystyki tektonicznego pola naprężeń trzeba podać kierunki trzech głównych naprężeń normalnych (σ_1 , σ_2 , σ_3) i ich wartości. Przekonano się jednak, że wpływ naprężenia o wartości pośredniej (σ_2) na odkształcenie jest zazwyczaj nieznaczny; dlatego w analizie tektonicznych pól naprężeń uwzględnia się z reguły tylko naprężenia o wartościach skrajnych (σ_1 i σ_3). Rozpatrujemy zatem tzw. płaski (dwukierunkowy, dwuosiowy) stan napięcia — w tej płaszczyźnie, w której owe naprężenia skrajne są zawarte (zwykle pionowej — w przekroju lub poziomej — w planie). Ponieważ kierunki działania naprężeń w obrębie obiektów geologicznych są zazwyczaj zmienne, przedstawia się je za pomocą linii krzywych, które w każdym swym punkcie są styczne do osi danego naprężenia. Krzywe te, nazywane często trajektoriami naprężeń, tworzą sieć prostokątną, gdyż osie głównych naprężeń normalnych są w każdym punkcie wzajemnie prostopadłe. Najczęściej spotykana charakterystyka tektonicznego pola naprężeń ogranicza się do przebiegu trajektorii σ_1 i σ_3 , oraz ewentualnie do ich znaku (ściskające, rozciągające). Znacznie rzadziej udaje się określić wartości naprężeń (również zmienne w przestrzeni), przy czym są to zwykle wartości największych naprężeń ścinających, będące funkcją głównych naprężeń normalnych.

Siły tektoniczne działały w przeszłości geologicznej i działają obecnie. Można więc mówić o „kopalnych” i o współczesnych tektonicznych polach na-

prężeń. Jedne i drugie są przedmiotem zainteresowania praktycznego, jednak z różnych powodów. Współczesne pola naprężeń tektonicznych, studiowane głównie metodami sejsmologicznymi oraz za pomocą bezpośrednich pomiarów naprężeń in situ, mają znaczenie przede wszystkim dla oceny zagrożenia sejsmicznego, oceny bezpieczeństwa obiektów inżynierskich i wyrobisk górniczych. Pola naprężeń odnoszące się do przeszłości geologicznej były istotnym współczynnikiem formowania się wielu złóż surowcowych i wobec tego badanie tych pól jest ważne przede wszystkim z poszukiwawczego punktu widzenia. Dlatego poniżej ograniczymy się do „kopalnych” pól naprężeń.

Dotychczas wypróbowano trzy grupy metod odtworzenia pól naprężeń, istniejących w przeszłości geologicznej: metody empiryczne, dedukcyjne i eksperymentalne (modelowe).

Metody empiryczne polegają na klasycznym w geologii postępowaniu według schematu: skutki → przyczyny. Wyrazem działania pewnego pola naprężeń jest określone pole odkształceń, które — o ile nie uległo zniszczeniu w toku późniejszych zdarzeń geologicznych — może być już poddane bezpośredniej analizie. Najczęstsze rodzaje odkształceń, będące przedmiotem takiej analizy, to podstawowe struktury tektoniczne — fałdy i uskoki. Jednakże poszukiwawcza wartość analizy pól naprężeń dotyczy głównie takich sytuacji, w których informacje o strukturach średniego rzędu są zbyt skąpe, by struktury te mogły być w pełni rozpoznane. Dlatego szczególnie obiecującym kryterium wnioskowania o polach naprężeń są struktury drobne (mezostruktury) i mikroskopowe (mikrostruktury); jedno i drugie na ogół można interpretować mając do dyspozycji jedy-

nie drobne odskłonięcia lub nawet, w niektórych przypadkach, rdzenie wiertnicze. Od dawna stosowano do tego celu, zwłaszcza spękania tektoniczne typu ścięciowego, wykorzystując znany fakt, że kąt ostrego między komplementarnymi (powstającymi jednocześnie) spękaniami ścięciowymi jest połowiony przez oś największego naprężenia głównego (σ_1), kąt rozwarty zaś — przez oś naprężenia najmniejszego (σ_3); (por. ryc. 6).

Kryterium to, propagowane m.in. przez M. W. Gzowskiego (m.in. — 8), posłużyło autorowi (14) do odtworzenia pozycji osi naprężeń w jednej z faz pokredowej aktywności tektonicznej na północnym obrzeżeniu Gór Świętokrzyskich. Dominującą orientację σ_1 w innej fazie na tym obszarze udało się określić za pomocą poziomej lineacji stylolitowej (13). Klasycznym przykładem rekonstrukcji pola naprężeń na podstawie drobnych zjawisk tektonicznych jest opracowanie Gzowskiego (9), dotyczące antyklinorium Bajdzansajskiego w Karatau (ryc. 3).

Subtelna grupa metod odtwarzania pól naprężeń są metody mikroskopowe, polegające na określaniu orientacji przestrzennej elementów geometrii i optyki kryształów w szlifach zorientowanych na stoliku uniwersalnym. Metody te, bardzo udoskonalone od czasu podstawowej monografii B. Sandera (18), stosowane są jednak głównie do charakteryzowania rozkładu odkształceń i naprężeń w obrębie niewielkich obiektów strukturalnych i to przede wszystkim do skał krystalicznych. Pracochłonność i koszty tych metod na razie nie pozwalają na ich szerokie rozpowszechnienie, choć podejmowane są próby ich usprawnienia za pomocą techniki komputerowej (np. 4).

Największą trudność przy rekonstruowaniu tektonicznych pól naprężeń metodami empirycznymi stanowi nakładanie się na siebie odkształceń wywołanych przez różne fazy tektoniczne. W takim przypadku rozpoznanie odkształceń reprezentujących fazę, której plan naprężeń pragniemy odtworzyć, może się okazać niemożliwe, co gorsza zaś, za odkształcenia te możemy pomylić struktury innej fazy bądź struktury zapoczątkowane wprawdzie w fazie badanej, ale następnie przekształcone.

Pola naprężeń różnych faz tektonicznych zazwyczaj różnią się od siebie, zatem interpretacja takich „nałożonych” pól odkształceń może być całkowicie fałszywa. Jeśli brak jest kryterium dla wyodrębnienia struktur fazy, która nas interesuje (np. wypełnienie szczelin jakiegoś wieku przez pewną generację mineralizacji), pozostaje w zasadzie jeden sposób rozwikłania zbioru odkształceń nałożonych: szczegółowe studia strukturalne nad ich wzajemnymi relacjami i poprzez to — nad kolejnością ich tworzenia się. Inymi słowy, aby wyodrębnić jakiś interesujący nas odcinek historii tektonicznej, trzeba poznać przynajmniej w zarysie wcześniejsze i późniejsze etapy tej historii — te, które bezpośrednio się złożyły na obecny obraz strukturalny. Dorobek naszej geologii dolnośląskiej (H. Teisseyre, J. Oberc i in.) przyniósł dowody, że skutecznym narzędziem takiej chronologicznej rekonstrukcji tektogenezy mogą być drobne struktury tektoniczne. Autor starał się uzasadnić podobne znaczenie tych struktur dla terenów nieorogennych (14).

Metody dedukcyjne badania tektonicznych pól naprężeń zapoczątkował W. Hafner (11), którego praca w ogóle otworzyła okres szerokiego zainteresowania całym zagadnieniem. Hafner rozpatrywał teoretycznie bloki skorupy ziemskiej o określonych wymiarach, poddane działaniu założonego zespołu sił tektonicznych (warunków brzegowych) i posiadające założone własności materiałowe (dostosowane do przeciętnych własności skał osadowych). Przyjmując ponadto generalne założenie, że rozpatrywane bloki reprezentują ośrodek sprężysty, Hafner mógł skorzystać z wypracowanych przez teorię sprężystości tzw. funkcji Airy'ego i obliczyć przestrzenny układ naprężeń σ_1 i σ_3 oraz wartości największych naprężeń

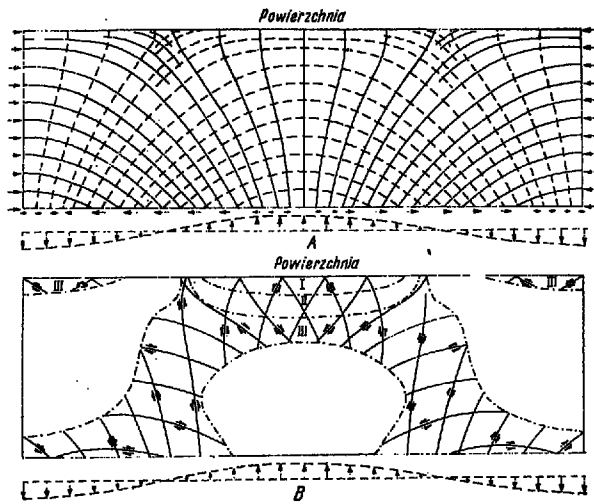
ściągających w poszczególnych miejscach bloku. Te zaś ustalenia pozwoliły na sporządzenie prognozy wykształcenia uskoku, tworzących się po przekroczeniu wytrzymałości materiału. Jedną z takich analiz Hafnera przedstawiają ryc. 1 A i B.

Mogłoby się zdawać, że konieczność przyjęcia licznych założeń osłabia lub wręcz przekreśla możliwość odniesienia tak skonstruowanego modelu matematycznego do konkretnych sytuacji geologicznych. Zastrzeżenia takie wysuwane są zresztą po dziś dzień (16), również w stosunku do badań eksperymentalnych. Nie ulega jednak wątpliwości, że obliczenia Hafnera i jego następców miały przełomowe znaczenie dla badań tektonicznych pól naprężeń. Prace te stworzyły bowiem ogólne ramy teoretyczne, dzięki którym, zgodnie ze schematem dedukcji, można porządkować i interpretować przypadki szczególne (choćby ich odchylenia od modelu teoretycznego były znaczne). Jest rzeczą zniemienną, że przewidziane przez Hafnera układy uskoku znalazły silne potwierdzenie w badaniach eksperymentalnych (p. niżej), a także w obserwacjach terenowych mimo, że warunek doskonałej sprężystości odpowiednich ośrodków z pewnością nie był dochowany. Z drugiej strony trzeba podkreślić, że opracowane dotychczas matematyczne modele tektonicznych pól naprężeń odnoszą się w zasadzie tylko do warunków, w których powstają uskoki i spękania (i to nie wszystkich typów).

Obliczenia pól naprężeń, towarzyszących formowaniu się struktur ciągłych (6), dotyczą tylko pojedynczych form fałdowych i na razie nie mają szerszego znaczenia praktycznego. Ze względu na niezwykłą złożoność wchodzących tu w rachubę zadań typu reologicznego, istotny postęp w tej dziedzinie przyniesie prawdopodobnie zastosowanie elektronicznej techniki obliczeniowej. Dało ono zresztą już pewne wyniki w analizie odkształceń nieciągłych (3).

Eksperymentalne (modelowe) metody badania tektonicznych pól naprężeń obejmują modelową kontrolę odkształceń przewidzianych na podstawie teoretycznej analizy naprężeń (19) i, co znacznie ważniejsze, określanie planu i wartości naprężeń w modelach, odwzorowujących naturalne struktury tektoniczne. Pionierską rolę w tej drugiej grupie badań odegrał wybitny tektonofizyk radziecki M. W. Gzowski (bibliografia prac — patrz 10). Wraz ze współpracownikami zaadaptował on do potrzeb tektoniki elastooptyczną metodę badania naprężeń, stosowaną od dawna w technice. Przygotowano specjalne materiały modelowe, odznaczające się aktywnością optyczną proporcjonalną do stanu naprężeń w materiale, a zarazem spełniające warunki podobieństwa fizycznego przewidziane przez teorię modelowania tektonicznego (1, 12). Próbkę sporządzoną z tych materiałów poddaje się żądanym odkształceniom (formującym odpowiednie struktury tektoniczne) w polu widzenia specjalnie skonstruowanego układu polaryzacyjnego. Rozkład widocznych na ekranie barw interferencyjnych oraz linii zwanych izochromami i izoklinami informuje nas o wartościach największych naprężeń ściągających i o kierunkach głównych naprężeń normalnych.

Metoda polaryzacyjno-optyczna ma dwie wielkie zalety: możliwość śledzenia ewolucji stanu naprężeń w toku procesu deformacji i możliwość badania odkształceń nie tylko sprężystych, lecz także plastycznych (drogą doboru odpowiednich własności materiałów modelowych i odpowiednich warunków brzegowych). Najwięcej trudności przysparza tu, podobnie jak we wszelkim modelowaniu tektonicznym, niedostateczna znajomość prędkości naturalnych procesów tektonicznych, informacje z tego zakresu są jednak ostatnio coraz obfitsze. Schemat eksperymentów Gzowskiego, odnoszących się do antykliny powstającej pod działaniem wypaczającego się ku górze podłoża, przedstawia ryc. 1 C. Zbieżność tego obrazu z teoretycznymi wynikami Hafnera odnoszą-



Ryc. 1. Wyniki obliczeń W. Hafnera dla bloku litosfery poddanego wypiętrzaniu pionowemu (A, B) i wyidealizowany schemat podobnego przypadku w eksperymentach elastooptycznych M. W. Gzowskiego (C).

A — warunki brzegowe (strzałki) i wynikające z nich pole naprężeń (linie ciągłe — trajektorie σ_1 , linie przerywane — trajektorie σ_2), B — pole odkształceń (I, II, III — kolejność tworzenia się uskoków w poszczególnych fragmentach bloku), C — rozkład największych naprężeń ścinających odczytany z barw interferencyjnych (gęstsze kropki — większe wartości naprężeń).

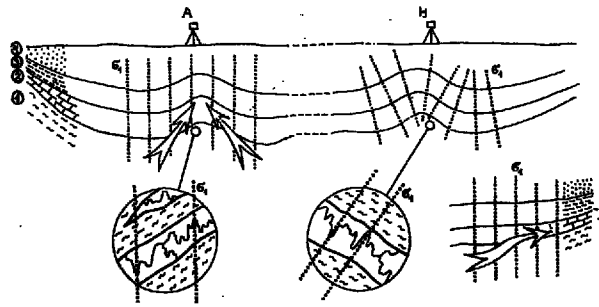
Fig. 1. Results of W. Hafner's calculations for lithosphere block subjected to sinusoidal uplift (A, B) and idealized scheme of similar case obtained during elastooptic experiments by M. W. Gzowski (C).

A — boundary conditions (arrows) and resulting stress field (continuous lines — trajectories σ_1 , broken lines — trajectories σ_2), B — strain field (I, II, III — sequence of formation of faults in particular fragments of block), C — distribution of maximum shear stress read from interference colors (the more densely spaced dots, the higher magnitude of stress).

cymi się do podobnych warunków brzegowych (ryc. 1 A i B) jest znaczna mimo, że szczegółowe założenia obydwu modeli różnią się dość poważnie.

Znaczenie poszukiwawcze powyżej naszkicowanych badań rozpatrzmy na wybranych przykładach. Zdaniem autora, znaczenie to dotyczy trzech etapów postępowania poszukiwawczego (sklasyfikowanych wyłącznie na użytek niniejszego tekstu): ogólnego, szczegółowego i eksploatacyjnego.

Etap ogólny, w którym chodzi o określenie terenów (regionów lub ich części), na jakich w danym czasie istniały sprzyjające warunki dla procesów złożotwórczych. Zatrzymamy się na jednym tylko przykładzie. Wyobraźmy sobie, że w obrębie rozleg-

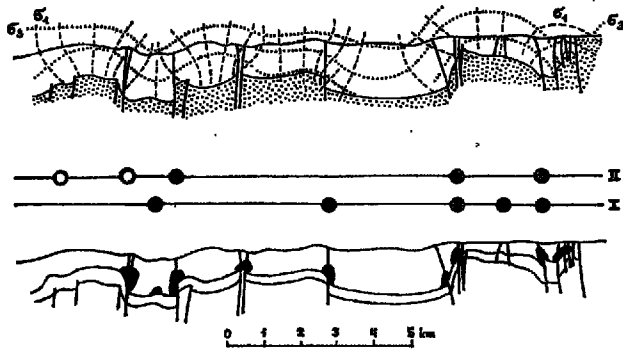


Ryc. 2. Przykład wykorzystania analizy pola naprężeń do oceny warunków akumulacji bituminów.

1 — seria macierzysta, 2 — kolektor, 3 — seria ekranująca, 4 — nadkład; strzałki — kierunki migracji bituminów. Fragment z prawej strony u dołu — sytuacja w prawej części basenu przed utworzeniem antykliny. Pozostałe objaśnienia w tekście.

Fig. 2. Example of application of stress field analysis in evaluating bitumen accumulation conditions.

1 — parent series, 2 — collector, 3 — blanket series, 4 — overburden. Arrows — bitumen migration routes. Lower right part of the figure illustrates situation in the right part of the basin before formation of anticline. The remaining explanations are given in the Polish text.



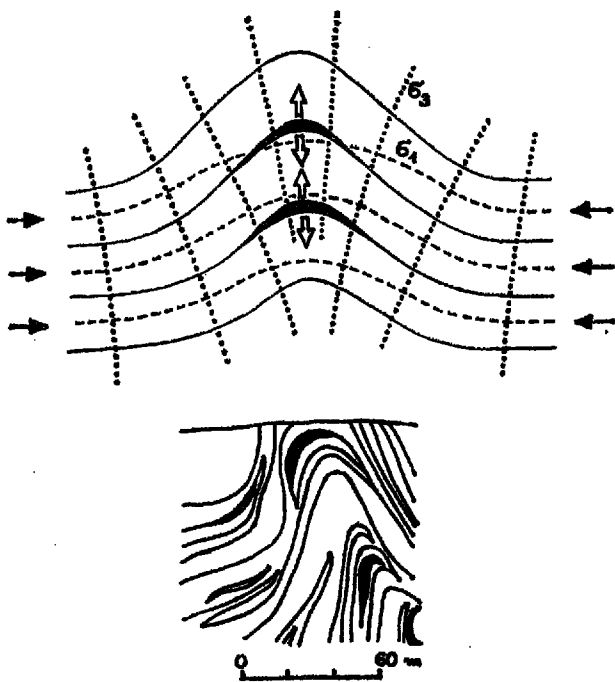
Ryc. 3. Pole naprężeń hercyńskich (u góry) i oparta na nim prognoza poszukiwawcza okruszcowania hydrotermalnego (u dołu) dla antyklinorium Bajdzansajskiego w Karatau (wg M. W. Gzowskiego).

Pola zaczerknione — przewidywane złoża. I — stan znajomości przed prognozą, II — stan znajomości po prognozie (kółka pełne — złoża, kółka puste — przejawy rudne).

Fig. 3. Hercynian stress field (in the upper part) and prognosis of hydrothermal mineralization prospecting based on analysis of that field (in the lower part of the figure), made for Bajdzansaj anticlinorium in Karatau (after M. W. Gzowski).

Black areas — inferred deposits. I — knowledge prior to the prognosis, II — knowledge after the prognosis was made (solid circles — deposits, open circles — traces of mineralization).

łej depresji strukturalnej, skomplikowanej przez drugorzędne fałdy, istnieje układ litologiczny korzystny dla akumulacji węglowodorów (ryc. 2). Założmy też, że o akumulacji tej w danym przypadku decydowała migracja bituminów, dokonująca się pod wpływem generalnej kompaktacji profilu skalnego, w tym zwłaszcza serii macierzystej. W tej sytuacji ważne z punktu widzenia perspektyw poszukiwawczych



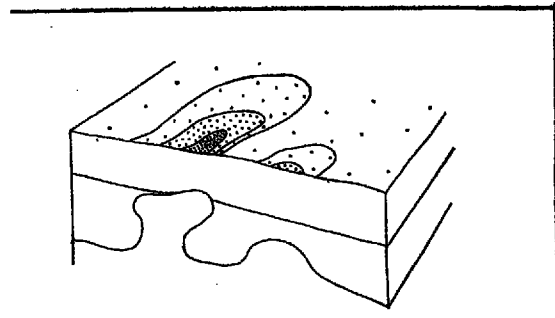
Ryc. 4. Geneza złóż siodłowych: stan naprężeń w antyklinie pochodzącej z poziomego ściskania (u góry) i przykład hydrotermalnych żył siodłowych w Karatau (u dołu wg T. E. Masalowej).

Fig. 4. Genesis of saddle reefs: stress field in antycline resulting from horizontal compression (upper part) and example of hydrothermal saddle reefs from Karatau (lower part; after T. E. Masalowa).

wyduje się pytanie o wiek tej kompaktacji w stosunku do wieku struktur, stanowiących potencjalne pułapki złożowe. Jeśli redukcja porowatości i miąższości dokonała się zasadniczo przed uformowaniem struktur drugorzędnych, wolno się spodziewać, że węglowodory wyciskane z serii macierzystej lub kolektorskiej i nie znajdujące zapór na drodze ku powierzchni, dotarły do niej i uległy zniszczeniu. Jeżeli natomiast wyodrębnienie się struktur składowych w obrębie basenu przypadło na wczesny okres kompaktacji, której zasadniczą część dokonała się później, sytuacja ze złożowego punktu widzenia była korzystna (ryc. 2).

Poważnych możliwości odpowiedzi na postawione tu pytanie może dostarczyć analiza pola naprężeń z okresu decydujących zmian porowatości skał. I tak np. jeśli w otworze A na ryc. 2 w pochylonych warstwach stwierdzimy lineację stylolitową o położeniu pionowym (a więc ukośnym względem warstw), to należy sądzić, że trajektorie największego naprężenia σ_1 , reprezentowanego w tym przypadku przez obciążenie grawitacyjne, w okresie najbardziej efektywnej kompaktacji (na temat roli stylolityzacji w tym procesie — patrz np. 15, 21) zajmowały położenie niezależne od już utworzonych struktur, a zatem miała miejsce sytuacja druga (korzystna). Inaczej, gdy w innej części tegoż basenu (otwór B na ryc. 2) lub na innym obszarze stwierdzimy lineację stylolitową ustawioną prostopadle do sfałdowanych ławic; zachodzi wówczas sytuacja pierwsza (niekorzystna).

Powyżej uwzględniliśmy tylko najprostszyszy, grawitacyjny czynnik stylolityzacji i zmian własności skał. Znaczenie stylolityzacji tego rodzaju dla geologii naftowej skonstatował H. V. Dunnington (7). Trudno jednak wątpić, że potężnym czynnikiem migracji bituminów mogą być tangencjalne naciski tektoniczne. Stosunek tych nacisków do fazy strukturalnego



Ryc. 5. Schemat możliwej zależności między wysadami solnymi w głębi a gęstością spękań (wyrażoną przez gęstość kropek) na powierzchni.

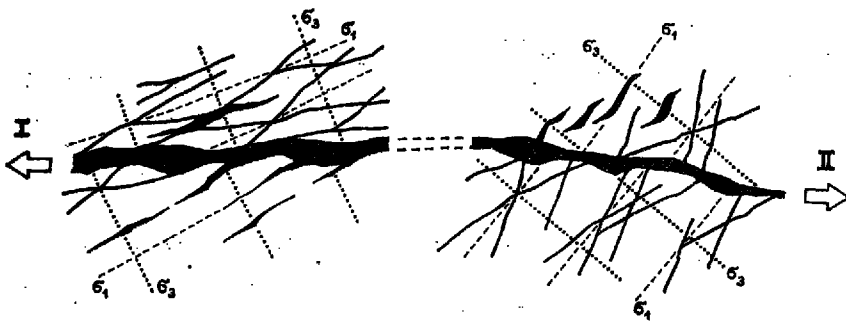
Fig. 5. Scheme of possible interdependence between deep-seated salt diapirs and density of fractures (marked with an increased concentration of dots) at the surface.

rozcienkowania danego obszaru wydaje się mieć równie ważne znaczenie dla perspektyw złożowych, jak w przypadku omówionym poprzednio. Podobna też może być technika rozstrzygnięcia całego zagadnienia, przy czym posłużyć się można nie tylko stylolitami, lecz także szeregiem innych drobnych struktur tektonicznych; niektóre z nich mogą być rozpoznane w rdzeniach wiertniczych.

Prace poszukiwawcze etapu szczegółowego, zmierzające do zlokalizowania i bliższej charakterystyki przestrzennej nagromadzeń złożowych, mogą być szczególnie skutecznie wsparte przez analizy tektonicznych pól naprężeń. Już sprawdzonym przykładem jest wspomniane antyklinorium bajdzansajskie (ryc. 3). Wykonana dlań przez Gzowskiego (9) rekonstrukcja pola naprężeń (w przekroju) z okresu górotwórczości hercyńskiej wykazała wachlarzowate układy trajektorii σ_1 (i odpowiednio, łukowate układy σ_2), charakterystyczne dla fałdowań pokrywy dokonujących się pod wpływem pionowej ruchliwości podłoża. Bliższa analiza doprowadziła do wniosku, że chodzi tu o struktury typu nadblokowego, mające w podłożu bloki uskokowe i same w dużym stopniu ograniczone przez uskoki i fleksury (w większości niewidoczne na powierzchni). Na tej podstawie, uwzględniając szczegóły zmienności odtworzonego pola naprężeń, skonstruowano prognozę złożową dla stwierdzonych już na tym terenie surowców polimetalicznych natury hydrotermalnej. Prognoza ta wykazała znaczny stopień trafności (ryc. 3).

Innym przykładem możliwości prognozowania występowania złożowych może być zagadnienie tak zwanych w literaturze anglosaskiej saddle reefs — „żył siodłowych”. Są to wypełnienia kruszcowe soczewkowatych przestrzeni międzyławicowych, otwierających się w przegubowych partiach niektórych fałdów (ryc. 4). Badania eksperymentalne Gzowskiego i współpracowników (por. 1) rzuciły sporo światła na mechaniczne warunki tworzenia się przestrzeni siodłowych. Badania te świadczą m.in. o tym, że próżnie siodłowe mogą powstać tylko w fałdach będących produktem poziomego ściskania. Układ trajektorii naprężeń w takich fałdach (w okresie fałdowania) jest diametralnie przeciwny, niż w fałdach utworzonych przez siły pionowe (por. ryc. 3 i 4), a szereg innych szczegółowych cech pola naprężeń ułatwia lub utrudnia rozpojenie ławic w określonych miejscach. Studia nad polami naprężeń mogą więc posłużyć do skutecznego prognozowania lokalizacji złóż związanych z omawianym zjawiskiem.

Bywają przypadki, w których elementem decydującym o prognozie złożowej nie jest aspekt jakości-



Ryc. 6. Zależność racjonalnego kierunku eksploatacji (lub dalszego rozpoznania) złoża żyłowego od pola naprężeń z okresu utworzenia się dyslokacyjnej szczeliny złożowej, odczytanego ze spękań pierzastych.

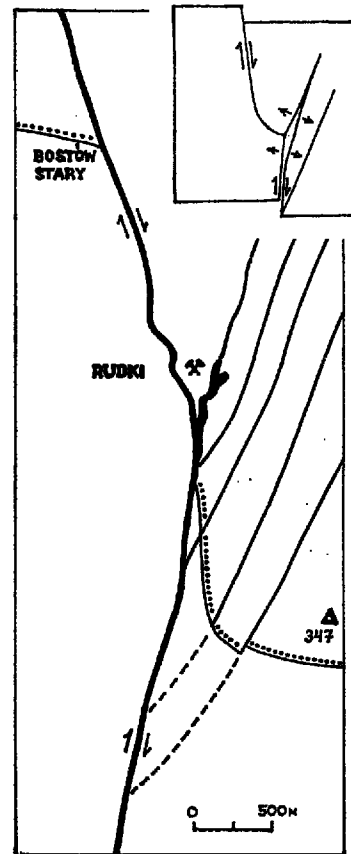
I — kierunek korzystny, II — kierunek niekorzystny.

Fig. 6. Dependence of optimal direction of exploitation (or further prospecting) of vein deposit on stress field from the times of formation of dislocational deposit fracture, read from the feather fractures.

I — advantageous direction, II — disadvantageous direction.

wy (kierunki trajektorii), lecz ilościowy (wartości energii tektonicznej) pola naprężeń. Jeden z takich przypadków przedstawia ryc. 5, inspirowana przez badania P. H. Blancheta (2). Przedmiotem poszukiwań są tu wysady (np. solne), które nie dają objawów powierzchniowych prócz zwiększonej intensywności drobnych zjawisk tektonicznych (tu spękań), związanej z przekazaniem przez migrującą sól skalom nadkładu większej niż w sąsiedztwie ilości energii. Ilościowe opracowanie tej intensywności na powierzchni (np. mapa gęstości spękań) może się przyczynić do zlokalizowania wysadów, do przybliżonego określenia ich rozmiarów, kształtu i głębokości stropu. Naturalnie rekonstrukcja jakościowa (kierunkowa) planu naprężeń z okresu dźwignia się wysadów może tę analizę znacznie uściślić.

Etapem eksploatacyjnym procedury poszukiwawczej nazywam tu dalsze rozpoznawanie złóż już odkrytych. Analiza tektonicznych pól naprężeń może być pomocna na tym etapie w przypadku złóż, które tworzyły się choć w części przy udziale czynników tektonicznych, bądź przez czynniki te zostały przekształcone. Dla przykładu rozpatrzmy złoża kruszcowe typu żyłowego, wypełniające rozległą szczelinę dyslokacyjną o zmiennej szerokości (ryc. 6). W sprzyjających warunkach można pokusić się o przewidywanie kierunku, w którym rozwarcie szczeliny powinno utrzymywać się najdłużej i mieć największą wartość. Spośród dwu kierunków dalszych poszukiwań i ewentualnej eksploatacji przedstawionych na ryc. 6 kierunek I jest korzystny, gdyż trajektorie naprężenia σ_1 (największego ściskania), odtworzone na podstawie spękań kulisowych synchronicznych z uskokiem, przecinają szczelinę uskokową pod małym kątem, a trajektorie naprężenia σ_2 (rozciągania lub najmniejszego ściskania) — pod dużym. W oznaczonym kierunku można więc oczekiwać znacznej rozciągłości szczeliny (lub sąsiednich szczelin o podobnej orientacji) oraz tendencji do powstawania przestrzeni złożowych. Kierunek II jest niekorzystny, gdyż stosunek trajektorii naprężeń do strefy okruszcowanej jest tu przeciwny, niż w przypadku poprzednim. W kierunku tym można więc oczekiwać tendencji do zaciskania i urywania się szczelin. Perspektywiczność kierunków prostopadłych do płaszczyzny rysunku zależy przede wszystkim od rodzaju uskoków i kształtu powierzchni uskokowej, które to czynniki (obok



Ryc. 7. Szkic tektoniczny okolic Rudek koło Nowej Słupii (wg J. Czarnockiego i interpretacji autora).

Linia kropkowana — spąg dewonu; grube linie ciągłe — uskoki; pole zaczerńnione — złoża pirytu i rud Fe. W prawym rogu u góry — proponowany schemat genezy przestrzeni złożowej.

Fig. 7. Tectonic sketch of the vicinity of Rudki near Nowa Słupia (after J. Czarnocki and on the basis of interpretation by the present author).

Dotted line — base of the Devonian; heavy continuous line — faults; black area — pyrite and Fe ore deposits. Suggested scheme of formation of the space for the deposits is given in the upper right corner.

innych) muszą zresztą być uwzględnione przy jakiegokolwiek prognozie tektoniczno-złożowej omawianego typu.

Powyższe przykłady, rzecz jasna nie dające pełnego przeglądu możliwości, jakich dostarcza geologii poszukiwawczej analiza tektonicznych pól naprężeń, nie objęły w ogóle aspektów strukturalnych tej analizy, tj. pomocy w określaniu ogólnej budowy terenów surowcowych, odkształceń ciał złożowych itp. Możliwości te są poważne, ale mogą być przedstawione tylko na szerszym tle mechaniki różnych form strukturalnych, co przekracza ramy niniejszego artykułu.

W zakończeniu rozpatrzmy przykład wprowadzie niesprawdzony, ale odnoszący się do rejonu dobrze znanego ogółowi polskich geologów — okolic Rudek koło Nowej Słupii (ryc. 7). Pobieżne spostrzeżenia w tym rejonie, wykonane przez autora z okazji opracowania tektoniki przyległego obszaru mezozoicznego (14) przemawiają za tym, że w okresie formowania się dyslokacji łysogórskiej lub nieco później

pole naprężeń na tym obszarze cechowało się występowaniem trajektorii dwu naprężeń skrajnych (σ_1 , σ_2) w płaszczyźnie poziomej. Jeśli zaś tak było, to jest prawdopodobne, że dyslokacja Iysogórska ma charakter przesuwczą lub przynajmniej posiada dużą składową przesuwczą, a charakterystyczny zbiór uskoków towarzyszących w skrzydle wschodnim można uważać — zgodnie z jego cechami — za ostrokątny zespół ścieg kulisowych, jakie są często obserwowane w otoczeniu współczesnych i dawnych uskoków przesuwczych (np. 20).

Ponieważ dyslokacja Iysogórska doznaje w okolicy Rudek dość znacznej zmiany kierunku (z ok. 155° na ok. 185°), przeto konsekwencją ruchu przesuwczego o zwrocie prawoskrętnym (wynikającym z mapy geologicznej i z układu wspomnianych uskoków towarzyszących) musiało być wywiązanie się w rejonie zajętym przez obecne złoża pirytu znacznych naprężeń rozciągających według schematu załączonego do ryc. 7. Wyładowanie się tych naprężeń nastąpiło wzdłuż powierzchni jednego z utworzonych już uskoków kulistowych, a otwierająca się w ten sposób przestrzeń złożowa zyskała nachylenie ku wschodowi (por. 5, fig. 31) dzięki wzmożonemu w tej okolicy (w związku ze zmianami relacji naprężeń głównych) oddziaływaniu obciążenia grawitacyjnego. Innymi słowy, wskutek pojawienia się w tym miejscu znacznego rozciągania, ruch uskokowy, wykorzystując zresztą lokalnie zrotowane ku wschodowi nachylenie ławic, przyjął tu charakter zrzutowo-przesuwczy.

Ewentualne potwierdzenie powyższej hipotezy przez dokładniejsze badania terenowe pozwoliłoby na sporządzenie prognozy tektonicznej dla dalszych poszukiwań mineralizacji złożowej typu rudkowego, których kierunki były dotychczas wyznaczone m.in. przez litologię i dość powierzchowne analogie strukturalne. Zdaniem autora, prognoza ta powinna objąć okolice Nosowa i Mychowa. W rejonie tym bowiem rozległe dyslokacje: starachowicko-godowska i Iubieńskiego-mychowska, które według badań autora (14) posiadają znaczną przesuwczą składową ruchu, doznają energicznego skrętu na przejściu do poprzecznych uskoków wkraczających w obszar paleozoiczny, z których zwłaszcza uskok wschodni odznacza się pokaźną amplitudą w intersekcji. Jednocześnie w strefie tej mamy do czynienia z pasmem występień utworów paleozoicznych spod pokrywy triasowej, zdradzających płytkie położenie podłoża paleozoicznego (grzbiet wglębny Brónkowiec-Zawichost wg W. Pożaryskiego, 17). Gdyby przyjąć preformowanie przynajmniej południowych odcinków wspomnianych dyslokacji przez starsze uskoki przedmezozoiczne o podobnym charakterze jak dyslokacja Iysogórska, należałoby we wspomnianym rejonie przewidywać wywiązanie się w okresie późnowaryscyjskim i późniejszym znacznych naprężeń rozciągających, sprzyjających wędrowce rozтворów mineralizujących i utworzeniu próżni złożowych. Podobnych warunków można by oczekiwać w paru innych miejscach, m.in. w rejonie Zwola — Stryczowice.

LITERATURA

1. Biełousow W. W., Gzowski M. W. — Eksperimentalnaja tectonika. Niedra, Moskwa, 1964.

SUMMARY

Ancient tectonic stress fields may be reconstructed by means of: (a) empirical methods, e.g., inferring from preserved strain fields, (b) deductive methods, e.g., calculations based on accepted premises, and (c) experimental methods, e.g., modelling of optically active materials observed in polarized light. Such analyses may be of some importance for general prognosis of ore-forming conditions (fig. 2), for detailed prognosis of ore localization (Figs. 3—5), for determining optimal directions of ore exploitation, and for further surveying of already known ores (Fig. 6).

2. Blanchet P. H. — Development of fracture analysis as exploration method. Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 1957, vol. 41, nr 8.
3. Bock H. — Vielfache Bruchstrukturen bei einfachen Beanspruchungen — rechnerische Untersuchungen mit Hilfe der Finite-Element-Methode. Geol. Rundschau, 1972, Bd. 61, H. 3.
4. Braun G. — Computerdarstellung von Achsenverteilungsanalysen. Geol. Rundschau, 1972, Bd. 61, H. 3.
5. Czarnocki J. — Geologia regionu Iysogórskiego. Prace IG, 1957, t. 18.
6. Dieterich J. H., Carter N. L. — Stress-history of folding. Amer. Journ. Sc., 1969, vol. 267, nr 2.
7. Dunnington H. V. — Aspects of diagenesis and shape change in stylonitic limestone reservoirs. 7-th World Petrol. Congr. Proc., vol. 2, London-Colchester, 1967.
8. Gzowski M. W. — Tiektoniczieskie pola naprężenij. Izv. AN SSSR, ser. geofiz., 1954, nr 5.
9. Gzowski M. W. — Osnownyje woprosy tiektonofiziki i tiektonika Bajdzansajskiego antiklinoria. Izd. AN SSSR, Moskwa, 1959—1963.
10. Gzowski M. W. — Matematika w geotiektonike. Niedra, Moskwa, 1971.
11. Hafner W. — Stress distributions and faulting. Geol. Soc. Am. Bull., 1951, vol. 62, nr 4.
12. Hubbert M. K. — Theory of scale models as applied to the study of geologic structures. Geol. Soc. Am. Bull., 1937, vol. 48, nr 10.
13. Jaroszewski W. — New site of tectonic stylolites. Bull. Ac. Pol. Sci., sér. sci. géol. géogr., 1969, vol. 17, nr 1.
14. Jaroszewski W. — Drobnostukturalne kryteria tectoniki obszarów neorogenicznych na przykładzie północno-wschodniego obrzeżenia mezozoicznego Gór Świętokrzyskich. Studia Geol. Pol., 1972, vol. 38.
15. Kopeliowicz A. W. — O strukturach rastworenia w niektórych osadocznym i effuziwno-osadocznym porodach. Izv. AN SSSR, ser. geol., 1960, nr 4.
16. Müller L. — Sind Berechnungen und Modellversuche zur Klärung tektonischer Fragen sinnvoll? Geol. Rundschau, 1973, Bd. 62, H. 1.
17. Pożaryski W. — Jura i kreda między Radomem, Zawichostem i Kraśnikiem. Biul. PIG, 1948, t. 46.
18. Sander B. — Einführung in die Gefügekunde der geologischen Körper. Springer-Verlag, Wien u. Innsbruck, 1948—1950.
19. Sanford A. R. — Analytical and experimental study of simple geologic structures. Geol. Soc. Am. Bull., 1959, vol. 70, nr 1.
20. Tchalenko J. S., Ambraseys N. N. — Structural analysis of the Dasht-e Bayaz (Iran) earthquake fractures. Geol. Soc. Am. Bull., 1970, vol. 81, nr 1.
21. Trurnit P. — Die relative Druck-Löslichkeit detritischer Mineralien und Gesteine. Geologie, 1969, Jg. 18, H. 1.

РЕЗЮМЕ

Тектонические поля напряжений геологического прошлого можно реконструировать эмпирическими (наблюдение сохранных полей деформаций), дедуктивными (вычисления, основывающиеся на принятых параметрах) и экспериментальными (моделирование на оптически активных материалах, наблюдаемое в поляризованном свете) методами. Такие анализы могут найти применение в определении общих условий рудообразования (рис. 2), в детальном прогнозировании распределения месторождений (рис. 3—5) и определении рациональных направлений разведки и разработки уже выявленных месторождений (рис. 6).