

Krystyna STEC

Główny Instytut Górnictwa, Katowice

Mechanizm ogniska wstrząsu i metody jego wyznaczenia

Słowa kluczowe

wstrząs, mechanizm ogniska, tensor momentu sejsmicznego

Streszczenie

Rejon Górnośląskiego Zagłębia Węglowego jest obszarem bardzo podatnym na wszelkiego rodzaju deformacje wynikające zarówno z przeszłej jak i obecnie prowadzonej eksploatacji górniczej, które są źródłem wysokoenergetycznych wstrząsów sejsmicznych. Wysoka aktywność sejsmiczna stanowi zagrożenie dla podziemnych wyrobisk jak również jest przyczyną dyskomfortu i uciążliwości dla mieszkańców a nawet uszkodzeń w infrastrukturze powierzchniowej. W celu poznania charakteru tej sejsmiczności prowadzi się badania mechanizmu ognisk wstrząsów na podstawie, których można określić procesy zachodzące podczas ich występowania. W artykule przedstawiono metody określania mechanizmu ognisk wstrząsów oraz przykładowe wyniki. W wyniku prowadzonych od lat badań nad genezą wstrząsów wyróżniono grupę wstrząsów bezpośrednio związaną z prowadzoną eksploatacją, których ogniska znajdują się w pokładzie węgla lub w warstwach stropowych oraz wstrząsy o charakterze regionalnym, których ogniska związane są ze strukturami geologiczno-tektonicznymi i towarzyszącymi im strefami koncentracji naprężeń naturalnych oraz osłabień górotworu. Przykładem wstrząsów z pierwszej grupy są zjawiska, które spowodowały tąpnięcia w kopalniach „Staszic” i „Pokój”. Do drugiej grupy zaliczono wysokoenergetyczne wstrząsy z kopalni „Bobrek-Centrum”.

1. Wprowadzenie

Pierwsze próby opisu fizycznego mechanizmu trzęsienia ziemi zostały zrealizowane przez Reida w 1910 roku (Randall, 1971) i dotyczyły bardzo silnego zjawiska jakie miało miejsce w 1906 roku w San Francisco. Autor stwierdził, że zjawisko trzęsienia ziemi występuje w momencie, gdy część litosfery ulega odprężeniu ze stanu wysokich naprężeń poprzez wydzielenie energii wzdłuż pewnej płaszczyzny nazwanej płaszczyzną uskoku (fault plane). W związku z tym w dalszych pracach dotyczących określenia parametrów mechanizmu ognisk wstrząsów, czyli oznaczenia orientacji przestrzennej płaszczyzny uskoku przyjęto nazwę tych rozwiązań jako "rozwiązanie płaszczyzny uskoku" ("fault plane solution").

Jako pierwszy systematyczne badania nad orientacją płaszczyzny pęknięcia w ognisku trzęsienia ziemi podjął Byerly (1926). Na podstawie danych dotyczących trzęsienia Ziemi w Chile w 1922 r. określił jako pierwszy orientację płaszczyzny pęknięcia. Następnie Byerly

na podstawie horyzontalnych przemieszczeń dla rejestracji sejsmicznych w rejonie uskoku San Andreas (Kalifornia) wydzielił 4 kwadranty o równych polaryzacjach fali P. Otoczenie płaszczyzny pęknięcia w ognisku podzielił na ćwiartki, w których pierwsze wychylenie fali P odpowiada ruchowi od źródła (kompresja) lub w kierunku źródła (dylatacja). Kwadranty te są oddzielone dwiema ortogonalnymi płaszczyznami, z których jedna jest płaszczyzną ogniska a druga tzw. płaszczyzną pomocniczą. Byerly musiał rozwiązać dwa pojawiające się problemy, a mianowicie: zakrzywienie przebiegu promieni sejsmicznych na skutek niejednorodności budowy ośrodka i ustalenie płaszczyzn nodalnych na kuli ziemskiej. W celu rozwiązania tych zagadnień wprowadził do projekcji styczną do promienia sejsmicznego zamiast samego promienia oraz projekcją pozycji stacji sejsmograficznych na płaszczyznę równikową. Ponieważ metoda ta cechowała się pracochłonnością obliczenia, nie znalazły szerszego zastosowania w swej wersji oryginalnej. Dopiero Hodgson i Allen (1954) wprowadzając tablice z odległościami epicentralnymi i rutynowy program do określania rozwiązania płaszczyzny pęknięcia w ognisku zwiększyli jej efektywność i mogli wyznaczyć mechanizm ognisk tą metodą dla około 100 trzęsień ziemi rocznie. Ogólnie grupę graficznych metod określania mechanizmu ognisk trzęsień ziemi należy uznać jako rozwiązania istotne na pewnym etapie rozwoju badań tego problemu. Wniosły one wiele elementów poznawczych w to zagadnienie. Jednak duży udział czynników subiektywnych zależnych od interpretatora i wysoka pracochłonność prac interpretacyjnych powodowały, że metody graficzne należy uznać jako mało efektywne, szczególnie w odniesieniu do wstrząsów górniczych gdzie zbiory danych są bardzo liczne.

Zastosowanie techniki komputerowej i cyfrowego przetwarzania danych sejsmicznych spowodowało powstanie nowego podejścia w rozwiązywaniu mechanizmu ognisk wstrząsów. Możliwym stało się sprawdzanie wszystkich prawdopodobnych rozwiązań pod kątem ich zgodności z danymi obserwowanymi. Pierwszą próbą określania mechanizmu ognisk trzęsień ziemi przy zastosowaniu techniki komputerowej podjął Knopoff (1970). Jego metoda opierała się na wykorzystaniu funkcji prawdopodobieństwa, a mianowicie wychodząc od punktu startowego, określonego metodą graficzną, poszukiwał on najbardziej prawdopodobne rozwiązania. Istotne również badania wykonał Pearce (1977). Polegały one na pomiarach stosunków amplitud fal powierzchniowych i odbitych od powierzchni w stosunku do fali prostej P. Wykorzystał dla tego celu nieliczne wówczas obserwacje ze stacji dobrych technicznie. Metoda ta polega na systematycznym poszukiwaniu rozwiązania, które jest zgodne z danymi pomiarowymi.

Bardziej ogólne rozwiązanie, dające szersze rozpoznanie procesów zachodzących w ognisku wstrząsu, opiera się na inwersji tensora momentu sejsmicznego. Tensor momentu sejsmicznego określa liniową kombinację układu par sił z momentem. Wielkość ta została wprowadzona przez Gilberta (1970) w celu obliczeń przemieszczeń od punktowego źródła wstrząsu na powierzchni swobodnej. Następnie teorię tensora momentu sejsmicznego rozwinęli Backus i Mulcahy (1976).

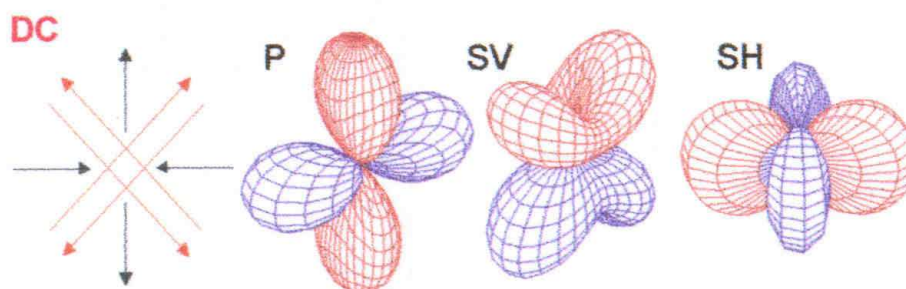
Badanie mechanizmów ognisk wstrząsów górniczych tą metodą prezentują prace wielu autorów (Sato i Fujii, 1989; Feignier i Young, 1992; McGarr, 1992). Metodyka inwersji tensora momentu sejsmicznego oraz wyniki pierwszych badań wstrząsów górniczych w Polsce zostały opisane przez Gibowicza i Wiejacza (1994). Od tego czasu zaczęto prowadzić coraz szersze badania większej ilości zjawisk sejsmicznych indukowanych eksploatacją górniczą. Badania te stworzyły szanse na bardziej jednoznaczne potwierdzenie faktu występowania różnych typów ognisk wstrząsów. Wstrząsy sejsmiczne podzielono ogólnie na dwie grupy.

Pierwsza grupa charakteryzuje się eksplozywnym lub implozywnym typem mechanizmu ognisk, są to wstrząsy słabsze energetycznie i zlokalizowane były pokładzie w sąsiedztwie czynnych frontów eksploatacyjnych. Mechanizm ognisk tych wstrząsów odzwierciedla procesy związane z destrukcją pokładu lub bezpośredniego jego otoczenia (Wiejacz 1995, Dubiński i inni 1999, Stec i Drzewiecki 2000, Stec 2005, 2007).

Najczęstszym typem mechanizmu ognisk w drugiej grupie wstrząsów jest mechanizm poślizgowy z zaznaczającym się poziomym przesunięciem w ognisku wstrząsu. Azymuty płaszczyzn rozrywu i ich upady dla tych zjawisk korelują się z rozciągłością i upadem struktur tektonicznych, w pobliżu których zlokalizowane były ogniska wstrząsów. Zależności te pozwalają wnioskować, że przyczyną tych zjawisk jest współdziałanie naprężeń rezydualnych istniejących w analizowanym obszarze z naprężeniami wywołanymi pracami górnictwymi (Zuberek i inni 1996, 1997, Dubiński i Stec 2001, Stec i Błaszczyk 2008).

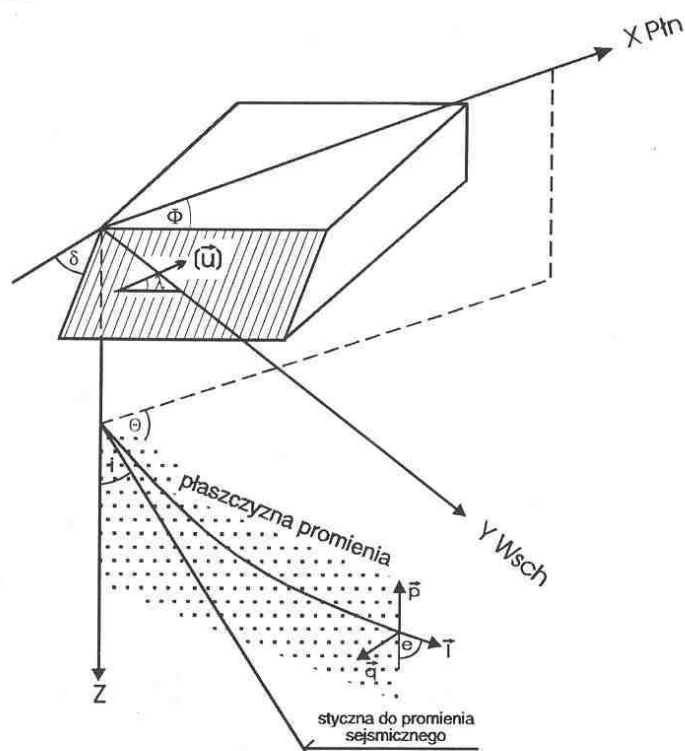
2. Metoda określania mechanizmu ognisk wstrząsów na podstawie rozkładu znaków pierwszych wychyleń fali podłużnej P

Wstrząsy górnicze podobnie jak trzęsienia ziemi powstają w wyniku działania systemów sił na ośrodek skalny, w którym tworzy się ognisko wstrząsu. Te systemy sił, odpowiednio zorientowane przestrzennie, prowadzą do rozwoju charakterystycznych dla nich przebiegów procesów dynamicznych, które są źródłem generacji fal sejsmicznych. W klasycznych modelach ognisk trzęsień ziemi opartych na hipotezie pęknięcia inicjowanego wskutek działania określonego układu sił najczęściej używany jest układ podwójnej pary sił. Układ ten powoduje w ognisku proces ścinający przejawiający się zaistnieniem ruchu przesuwnego mas wzdłuż pewnej płaszczyzny, zwanej płaszczyzną ogniskową lub płaszczyzną pęknięcia. Przy fizycznym modelu ogniska typu pęknięcie, które można opisać modelem podwójnej pary sił (model ścinania), występuje charakterystyczny rozkład emisji fal przestrzennych P i S oraz związany z nim rozkład pola przemieszczeń ośrodka wokół ogniska. Powstają, ściśle zdeterminowane przestrzennie obszary kompresji i dylatacji, rozdzielone dwiema ortogonalnymi płaszczyznami nodalnymi, czyli takimi, na których amplituda przemieszczeń jest równa zero (rys. 2.1). Położenie obszarów kompresji i dylatacji wyznacza się w oparciu o kierunki wychyleń ("+" lub "-") pierwszego wstąpienia fali podłużnej P na sejsmogramach wstrząsów.



Rys. 2.1. Pole radiacji fal sejsmicznych dla podwójnej pary sił
Fig. 2.1. The seismic wave radiation for the double couple forces

Charakterystyczny rozkład pola przemieszczeń w przypadku ogniska sejsmicznego opisanego modelem ścinania, daje się wyrazić przez wielkości określające orientację przestrzenną płaszczyzny ogniskowej (pęknięcia w ognisku), będącej jedną z płaszczyzn nodalnych i geometrię układu ognisko – punkt odbioru (rys. 2.2). Przyjęto układ współrzędnych zgodny z układem geograficznym.



Rys. 2.2. Schemat układu ognisko wstrząsu – punkt odbioru
 Fig. 2.2. The scheme source tremor – seismic station

Zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 2.2 geometrię płaszczyzny pęknięcia opisują kąty ϕ , δ , λ , które oznaczają:

- ϕ – rozciągłość lub bieg płaszczyzny pęknięcia tzn. kąt zawarty pomiędzy kierunkiem północy i kierunkiem linii przecięcia się płaszczyzny pęknięcia z płaszczyzną horyzontalną,
- δ – upad płaszczyzny pęknięcia jest to kąt zawarty pomiędzy płaszczyzną pęknięcia a płaszczyzną horyzontalną,
- λ – kąt poślizgu lub kąt przesunięcia – kąt pomiędzy wektorem przesunięcia i linią przecięcia płaszczyzny pęknięcia z płaszczyzną horyzontalną, mierzony w kierunku odwrotnym do ruchu wskazówek zegara.

Geometrię ognisko - odbiornik można opisać również przez następujące trzy kąty θ , i , e :

- θ – azymut stacji – kąt pomiędzy kierunkiem północy a kierunkiem na stację rejestrującą fale sejsmiczne,

i – kąt wyjścia fali ze źródła, mierzony pomiędzy osią pionową z i promieniem sejsmicznym, względnie styczną do tego promienia w ognisku,
 e – kąt emergencji fali w punkcie odbioru, mierzony w stosunku do osi z .

Charakterystykę promieniowania sejsmicznego, będącą wielkością skalarną dla źródła w postaci podwójnej pary sił, przedstawia poniższa zależność (Aki i Richards, 1980):

$$\begin{aligned}
 A^P &= \cos \lambda \sin \delta \sin^2 i \sin 2(\theta - \phi) \\
 &- \cos \lambda \cos \delta \sin 2i \cos(\theta - \phi) \\
 &+ \sin \lambda \cos 2\delta [\cos^2 i - \sin^2 i \sin(\theta - \phi)] \\
 A^{SV} &= \sin \lambda \cos 2\delta \cos 2i \sin(\theta - \phi) \\
 &- \cos \lambda \cos \delta \cos 2i \cos(\theta - \phi) \\
 &+ \frac{1}{2} \cos \lambda \sin \delta \sin 2i \sin 2(\theta - \phi) \\
 &- \frac{1}{2} \sin \lambda \sin 2\delta \sin 2i [1 + \sin^2(\theta - \phi)] \\
 A^{SHV} &= \cos \lambda \cos \delta \cos i \sin(\theta - \phi) \\
 &+ \cos \lambda \sin \delta \sin i \cos 2(\theta - \phi) \\
 &- \sin \lambda \cos 2\delta \cos i \cos(\theta - \phi) \\
 &- \frac{1}{2} \sin \lambda \sin 2\delta \sin i \sin 2(\theta - \phi)
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

gdzie:

A^P, A^{SV}, A^{SH} oznaczają kolejno amplitudy fal P, SV, SH.

W przyjętym układzie współrzędnych kierunku pierwszego wychylenia fali P jest dodatni, gdy ruch jest od źródła, fali SV w górę i fali SH w prawo, patrząc w kierunku propagacji fali.

Odpowiadające tym falom przemieszczenia w strefie dalekiej od źródła w punkcie o współrzędnych \vec{x} są równe:

$$\begin{aligned}
 \vec{u}^P(\vec{x}, t) &= \frac{A^P \mu A}{4 \pi \rho \alpha^3 r} \vec{u} \left(t - \frac{r}{\alpha} \right) \vec{l} \\
 \vec{u}^{SV}(\vec{x}, t) &= \frac{A^{SV} \mu A}{4 \pi \rho \beta^3 r} \vec{u} \left(t - \frac{r}{\beta} \right) \vec{p} \\
 \vec{u}^{SH}(\vec{x}, t) &= \frac{A^{SH} \mu A}{4 \pi \rho \beta^3 r} \vec{u} \left(t - \frac{r}{\beta} \right) \vec{q}
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

gdzie:

\bar{u} – prędkość dyslokacji w ognisku, α, β – prędkość propagacji fal P i S,
 A – powierzchnia pęknięcia, r – odległość rejestracji, μ – moduł sprężystości,

$\vec{l}, \vec{p}, \vec{q}$ – kierunki przemieszczeń fal sejsmicznych odpowiednio P, SV SH.

Przestrzenną orientację płaszczyzny pęknięcia w ognisku można wyznaczyć także w sposób graficzny. Podstawowym założeniem tej metody jest wprowadzenie tzw. kuli ogniskowej o jednostkowym promieniu, otaczającej hipocentrum wstrząsu i przestrzennie zorientowanej zgodnie z kierunkiem układu geograficznego oraz pionu. Przyjmuje się jednorodność ośrodka wewnątrz kuli, co oznacza, że promienie fal sejsmicznych są prostymi i prędkość ich propagacji jest wielkością stałą. W związku z tym promień sejsmiczny opuszczający źródło można opisać na półkuli ogniskowej górnej lub dolnej jako projekcję kątów azymutu stanowiska seismograficznego i kąta wynurzenia. Następnie dokonuje się transformacji obrazu z półkuli ogniskowej na płaszczyznę. Dla realizacji tego etapu stosuje się projekcję stereograficzną dolnej lub górnej półkuli ogniskowej znaną pod nazwą siatki Wulffa.

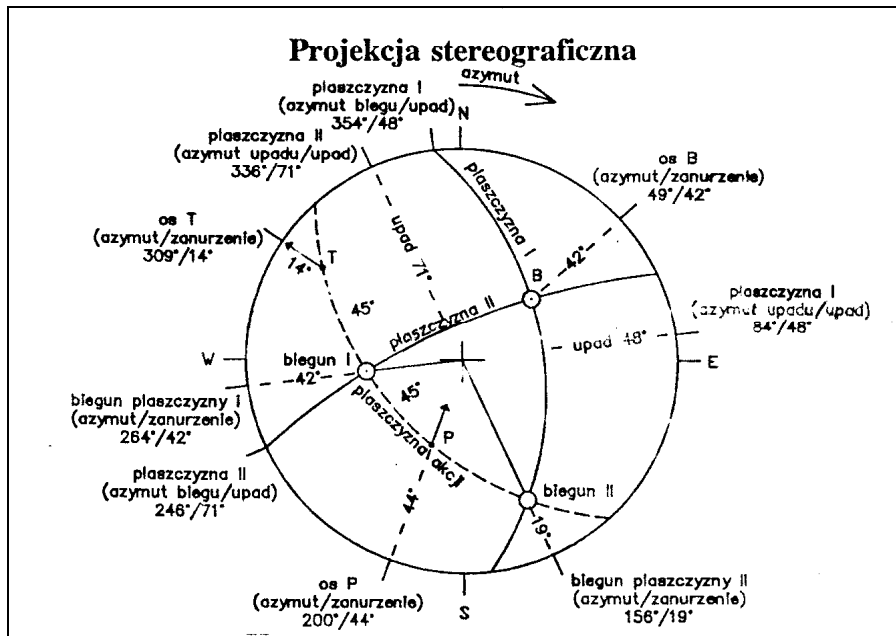
Po wykonaniu odwzorowania półkuli ogniskowej wydzieliła się na obrazie rzutu obszary kompresji i dylatacji a następnie oblicza katowe parametry rozwiązania mechanizmu ogniska wstrząsu.

Do parametrów tych należą:

1. Parametry określające przestrzenne położenie płaszczyzn nodalnych. Płaszczyzny nodalne są to dwie prostopadłe płaszczyzny rozdzielające obszary kompresji i dylatacji. Ich parametrami są:
 - azymut lub bieg płaszczyzny (wielkość tę określano wg konwencji podanej przez Herrmana (Gadomska, 1982) – "Bieg określa się jako kierunek uskołu taki, że płaszczyzna pęknięcia zapada w dół na prawo, gdy patrzy się w kierunku biegu"),
 - upad.
2. Parametry biegunów płaszczyzn nodalnych. Biegunem płaszczyzny nodalnej jest rzut stereograficzny normalnej do tej płaszczyzny na kulę ogniskową. Parametrami katowymi opisującymi położenie biegunów są:
 - azymut kierunku, będący kątem mierzonym w płaszczyźnie horyzontalnej między kołami wielkimi, w których leżą odpowiednio kierunek normalnej i kierunek północy,
 - zanurzenie określające kąt zawarty między płaszczyzną, w której leży normalna do płaszczyzny nodalnej a płaszczyzną horyzontalną.
3. Parametry płaszczyzny względnych przemieszczeń. Jest to płaszczyzna prostopadła do płaszczyzn nodalnych i przechodząca przez ich bieguny. Działają w niej naprężenia główne P i T. Jej parametrami są:
 - azymut, będący kątem pomiędzy kierunkiem północy a kierunkiem przecięcia się płaszczyzny względnych przemieszczeń z płaszczyzną horyzontalną,
 - upad, będący kątem między płaszczyzną względnych przemieszczeń a płaszczyzną horyzontalną.
4. Parametry osi naprężeń głównych - P (oś ściskania), T (oś rozciągania): Naprężenia P i T związane są z ogniskiem wstrząsu i charakteryzują lokalne warunki naprężeniowe powstawania zjawisk sejsmicznych. Katowymi ich parametrami są:
 - azymut, będący kątem mierzonym w płaszczyźnie horyzontalnej pomiędzy kołami wielkimi w których leży odpowiedni kierunek osi P lub T a kierunkiem północy,
 - zanurzenie określane jako kąt między płaszczyzną, w której leżą osie P lub T a płaszczyzną horyzontalną.
5. Parametry osi B. Oś B określana jest przez przecięcie dwu płaszczyzn nodalnych. Parametrami jej są:

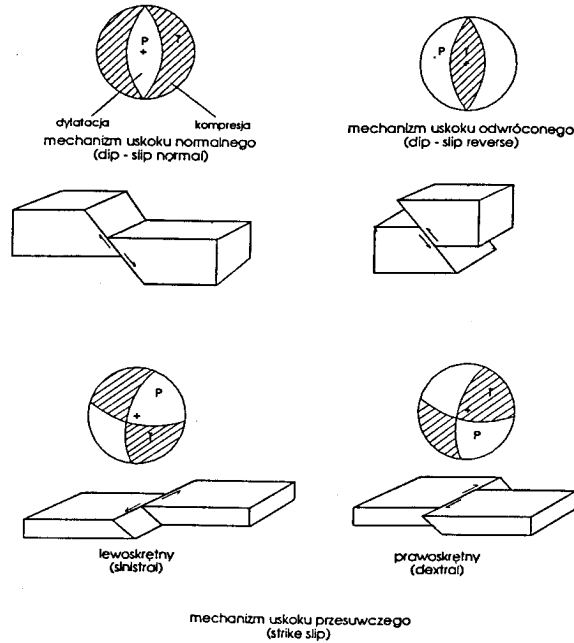
- azymut będący kątem mierzonym w płaszczyźnie horyzontalnej pomiędzy kołami wielkimi, w których leży kierunek osi B a kierunkiem północy,
 - zanurzenie będące kątem między płaszczyzną, w której leży oś B a płaszczyzną horyzontalną.
6. Kąt poślizgu lub kąt przesunięcia. Kąt poślizgu bywa także nazywany kątem spadku. Wyznacza się go po wybraniu jednej z płaszczyzn nodalnych jako płaszczyzny pęknięcia. Jest to kąt mierzony na płaszczyźnie pęknięcia, między kierunkiem przesunięcia a kierunkiem biegu płaszczyzny rozrywu; zmienia się od -180° do 180° . Przyjmuje on wartości dodatnie gdy liczony jest od kierunku biegu przeciwnie do ruchu wskazówek zegara.

Kątowe parametry rozwiązania mechanizmu ogniska wstrząsu w rzucie stereograficznym przedstawia rysunek 2.3 a podstawowe modele ognisk rysunek 2.4.



Rys.2.3. Kątowe parametry mechanizmu ogniska wstrząsu sejsmicznego (Gadomska, 1982)

Fig 2.3. Angular parameters of tremors source mechanism (Gadomska, 1982)



Rys. 2.4. Podstawowe typy mechanizmu ogniska wstrząsów sejsmicznych (Gadomska, 1982)
 Fig. 2.4. Main types of f tremors source mechanism (Gadomska, 1982)

3. Metoda inwersji tensora momentu sejsmicznego

Tensor momentu sejsmicznego opisuje układ sił reprezentujących źródło sejsmiczne jako liniową kombinację par sił z momentem. Pole przemieszczeń wywołane przez ten system sił jest sumą przemieszczeń wywołanych przez poszczególne pary sił (Aki i Richards):

$$u_k = M_{ij} \frac{\partial G_{ki}}{\partial x_j} = M_{ij} * G_{ki,j} \quad (3.1)$$

gdzie:

$G_{ki,j}$ – funkcja Greena.

M_{ij} – tensor momentu sejsmicznego źródła, reprezentowany przez macierz M o wymiarach 3×3 o składowych M_{ij}

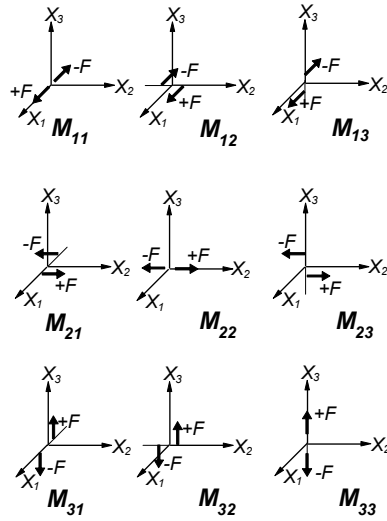
Graficznie M_{ij} można przedstawić jako dziewięć ogólnych par sił równoważnych pokazanych na rys. 3.1.

Wprowadzając tensor momentu sejsmicznego jako funkcję czasu i przyjmując, że rozmiary źródła są małe w porównaniu do obserwowanych długości fal sejsmicznych oraz zakładając, że wszystkie składowe tensora momentu sejsmicznego zależą w jednakowy sposób od funkcji czasu $s(t)$, pole przemieszczeń może być zapisane następująco:

$$u_k(x, t) = M_{ij} [G_{ki,j} * s(t)] \quad (3.2)$$

gdzie:

$s(t)$ – funkcja źródła.



Rys. 3.1. Układ dziewięciu możliwych par sił równoważnych M_{ij} działających w ognisku sejsmicznym ($i=j$ dipole bez momentu; $i \neq j$ dipole z momentem)

Fig. 3.1. The model of nine possible pair of forces, equivalent to M_{ij} , acting at a seismic source ($i=j$ dipoles without moment; $i \neq j$ dipoles with moment)

Tak więc, pole przemieszczeń u_k jest funkcją liniową składowych tensora momentu oraz wyrazów w nawiasach kwadratowych. Jeśli funkcja źródła jest funkcją Diraca, wówczas jedynym wyrazem w nawiasach kwadratowych pozostaje G_{kij} .

Tensor ten zapisuje się następująco:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{M} = M_{ij} \mathbf{e}_i \mathbf{e}_j = & 1/3(M_{11} + M_{22} + M_{33})(\mathbf{e}_1\mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_2\mathbf{e}_2 + \mathbf{e}_3\mathbf{e}_3) + \\
 & + 1/3(2M_{11} - M_{22} - M_{33})\mathbf{e}_1\mathbf{e}_2 + \\
 & + 1/3(2M_{22} - M_{33} - M_{11})\mathbf{e}_2\mathbf{e}_2 + 1/3(2M_{33} - M_{11} - M_{22}) \mathbf{e}_3 \mathbf{e}_3 + \\
 & + 1/2(M_{32} + M_{23})(\mathbf{e}_3\mathbf{e}_2 + \mathbf{e}_2\mathbf{e}_3) + 1/2(M_{32} - M_{23})(\mathbf{e}_3\mathbf{e}_2 - \mathbf{e}_2\mathbf{e}_3) + \\
 & + 1/2(M_{13} + M_{31})(\mathbf{e}_1\mathbf{e}_3 + \mathbf{e}_3\mathbf{e}_1) + 1/2(M_{13} - M_{31})(\mathbf{e}_1\mathbf{e}_3 - \mathbf{e}_3\mathbf{e}_1) + \\
 & + 1/2(M_{21} + M_{12})(\mathbf{e}_2\mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_1\mathbf{e}_2) + 1/2 (M_{21} - M_{12})(\mathbf{e}_2\mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_1\mathbf{e}_2)
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

gdzie: $\mathbf{e}_i, \mathbf{e}_j$ są wektorami jednostkowymi wzdłuż osi x_i, x_j .

Pierwszy wyraz po prawej stronie równania 3.3 opisuje procesy kompresji, a kolejne wyrazy opisują 3 dipole wzdłuż osi współrzędnych, 3 podwójne pary sił oraz 3 skręcenia dokoła osi współrzędnych. Procesy kompresji pochodzą od izotropowej części tensora momentu sejsmicznego, odpowiadającej zmianom objętościowym w źródle. Pozostałe 9 układów sił równoważnych tworzą dewiatoryczną część tensora momentu, którą poddaje się dekompozycji. Tensor momentu sejsmicznego jest symetryczny (zasada zachowania momentu obrotowego równoważnych sił w źródle), wówczas $M_{ij} = M_{ji}$ i skręcenia w równaniu opisującym tensor znikają. Dekompozycja tensora momentu sejsmicznego na część izotropową, na liniowy skompensowany dipol i na podwójną parę sił jest najczęściej przyjmowanym opisem źródła sejsmicznego.

W wyniku obliczeń programem SMT (Wiejacz 1994) uzyskuje się trzy modele ogniska wstrząsu opisane przez trzy rodzaje tensora momentu sejsmicznego:

- tensor ogólny posiada składową izotropową I opisującą zmiany objętości w ognisku (eksplozja $+/+$ lub implozja $-/-$), składową CLVD odpowiadającą jednoosiowemu ściskaniu $-/-$ lub rozciąganiu $+/+$ oraz składową ścinającą DC opisywaną przez podwójną parę sił.
- tensor dewiatoryczny (zmiana postaci bez zmiany objętości) posiada składową CLVD oraz składową ścinającą DC
- tensor czystego ścinania posiada tylko składową DC - ścinającą.

Eksplozyjny lub implozyjny model ogniska odpowiada procesom objętościowego niszczenia struktury ośrodka (np. wstrząsy występujące po strzelaniach wstrząsowych lub w pokładzie). Liniowy skompensowany dipol wektorowy odpowiada w przybliżeniu jednoosiowemu ściskaniu lub rozciąganiu. Modelem tym opisywano nagle przemiany fazowe w ogniskach głębokich trzęsień ziemi oraz rozrywy skał związane z rozciąganiem w obecności płynów pod wysokim ciśnieniem. Źródło sejsmiczne reprezentowane przez liniowy skompensowany dipol wektorowy może wyjaśnić jeden z mechanizmów wstrząsów górniczych w obszarze filarów ochronnych w głębokich kopalniach złota lub w kopalniach rud miedzi. Z kolei mechanizm opisany podwójną parą sił odpowiada wstrząsom związanym z pękaniem skał stropowych w kopalniach węgla kamiennego lub występujących w strefach uskoku.

4. Przykłady analizy mechanizmu ognisk wstrząsów

4.1. Mechanizm ognisk wstrząsów z kopalni Staszic

W KWK Staszic w dniu 23.02.2008 r. o godzinie 19:30 i 19:32 wystąpiły dwa wysokoenergetyczne wstrząsy o energii $8,0E+06$ J i $2,0E+07$ J, które doprowadziły do utraty funkcjonalności wyrobisk w rejonie ściany I (przekop Asea, pochylnia odstawcza) eksploatowanej w pokładzie 501. Pokład 501 w tym rejonie posiada zmienną miąższość dochodzącą do 7,25 m. Lokalnie występują ścienienia do grubości pozabilansowej, a także wyklinowania pokładu, uniemożliwiające jego wybieranie w sposób ciągły z podziałem na warstwy eksploatacyjne. Kierunki rozciągłości warstw NW–SE są zbliżone do przebiegu osi głównej struktury tektonicznej – siodła głównego, a upady o wielkościach 3–6 stopni są skierowane na SW.

Obliczenia mechanizmu ognisk wstrząsów metodą inwersji tensora momentu sejsmicznego wykonano dla 35 wstrząsów o energii $E \geq 5,0E+03$ J, które wystąpiły w okresie 08.12.2007 – 29.03.2008 r. Obliczenia te zostały przeprowadzone przez inwersję amplitud pierwszych wstąpień fali P z uwzględnieniem kierunków pierwszych wychyleń w domenie czasu przy pomocy programu SMT (Wiejacz 1994) dla przedziału głębokości ognisk od -200 do -600 m n.p.m. (błąd obliczeń ± 20 m). Najlepsze dopasowanie rozwiązania charakteryzujące się najmniejszym błędem obliczeń ERR i największym współczynnikiem dopasowania, uzyskano przy przyjęciu głębokości od -400 do -450 m n.p.m. Zestawienie wyników dla analizowanych wstrząsów przedstawia tabela 4.1 a przykład parametrów mechanizmu ognisk tabelę 4.2 – 4.3. Rysunki w tych tabelach przedstawiające rozwiązanie mechanizmu ogniska pokazują rzut równopowierzchniowy dolnej półkuli ogniskowej. Rozwiązanie lewe – pełny tensor rozłożony na składową izotropową /zmiany objętości/ (Expl), składową jednoosiowego ściskania lub rozciągania (CLVD) i składową odpowiadającą podwójnej parze sił /ściania/ (DC). Rozwiązanie środkowe – rozwiązanie dewiatoryczne złożone z CLVD i ścinania (DC). Rozwiązanie prawe – czyste ścinanie (DC).

Tabela 4.1. Zestawienie parametrów sejsmologicznych i parametrów mechanizmu ognisk wstrząsów, które wystąpiły podczas eksploatacji ściany I, w pokładzie 501/II w okresie od 08.12.2007 do 29.03.2008 roku

Table 4.1. Specification of seismological parameters and parameters of focal mechanisms, which occurred during longwall I mining, in the seam 501/II over the period from 8 December 2007 to 29 March 2008

Data	Czas		Energia, J	Współrzędne układ SG, m		Składowe tensora,%			typ mech.*
	h	m		X	Y	I	CLVD	DC	
2007-12-10	4	52	1.0E+04	22522	-13776	-20	-20	60	NO
2007-12-12	23	25	2.0E+04	22528	-13777	-20	-20	60	NO
2007-12-17	12	20	6.0E+03	22428	-13717	-20	-20	60	NO
2007-12-23	8	36	8.0E+04	22421	-13822	-20	-20	60	NO
2007-12-29	22	17	7.0E+03	22432	-13767	-15	-15	70	NO
2008-01-24	9	29	4.0E+04	22379	-13719	-20	-20	60	NO
2008-02-13	11	49	3.0E+04	22485	-13790	-20	-20	60	NO
2008-02-16	15	13	6.0E+04	22407	-13661	-20	-20	60	NO
2008-02-19	9	59	2.0E+04	22428	-13569	-20	-20	60	NO
2008-02-21	10	39	2.0E+04	22424	-13658	-20	-20	60	NO
2008-02-22	7	8	8.0E+04	22383	-13679	-17	-20	63	NO
2008-02-22	16	36	2.0E+04	22414	-13717	-19	-20	61	NO
2008-02-23	16	21	2.0E+04	22433	-13702	-20	-20	60	NO
2008-02-23	19	30	8.0E+06	22457	-13631	-20	-19	61	NO
2008-02-23	19	32	2.0E+07	22322	-13622	-13	-17	70	NO
2008-02-23	19	42	2.0E+04	22474	-13668	-19	-20	61	NO
2008-02-23	20	15	1.0E+04	22430	-13614	-11	-14	75	NO
2008-02-23	21	0	2.0E+05	22358	-13858	-19	-19	62	NO
2008-02-24	14	44	2.0E+04	22465	-13621	-20	-20	60	NO
2008-02-25	1	37	2.0E+05	22306	-13638	-12	-18	70	NO
2008-02-25	10	10	1.0E+05	22389	-13692	-20	-20	60	NO
2008-03-25	14	6	3.0E+05	22286	-13640	-11	-14	75	NO
2008-03-29	5	18	3.0E+05	22295	-13643	-18	-20	62	NO
2007-12-08	2	5	7.0E+03	22599	-13833	46	47	7	RE
2007-12-19	23	24	5.0E+03	22458	-13776	50	49	1	RE
2007-12-22	17	7	8.0E+03	22547	-13822	49	48	3	RE
2008-01-06	6	40	6.0E+03	22503	-13748	49	49	2	RE
2008-01-12	23	1	6.0E+03	22394	-13708	50	49	1	RE
2008-02-13	6	5	5.0E+03	22324	-13589	44	43	13	RE
2008-02-13	6	7	5.0E+03	22334	-13591	49	49	2	RE
2008-02-13	22	8	9.0E+03	22460	-13821	43	40	17	RE
2008-02-20	21	12	5.0E+03	22454	-13638	49	49	2	RE
2008-02-22	14	31	5.0E+03	22410	-13670	50	49	1	RE
2008-02-23	6	58	8.0E+03	22417	-13659	49	49	2	RE

* typ mechanizmu: NO – mechanizm normalny, RE – mechanizm odwrócony

Z analizowanej grupy wstrząsów, 23 zjawiska charakteryzowały się ścinającym typem mechanizmu ogniska. Proces pęknięcia w przypadku tych wstrząsów zachodził na uskoku normalnym a w ich mechanizmie dominowała wyraźnie składowa ścinająca (od 60 do 75%). Kierunek płaszczyzn nodalnych określający kierunek pęknięcia w ognisku dla wysokoenergetycznych wstrząsów z 23.02.08 r. o energii 8,0E+06 J i o energii 2,0E+07 J, oraz z 25.02.08 r. o energii 1,0E+05 J, 29.03.08 r. o energii 3,0E+05 J miał przebieg NE–SW lub N–S. Kierunek ten, w granicach błędów obliczeń $\pm 20^\circ$ był równoległy do przebiegu przekopu Asea i pochylni odstawczej oraz linii frontu eksploatawanej ściany.

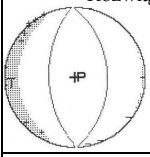
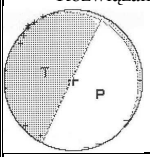
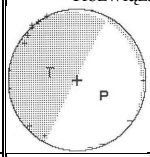
Przeprowadzona analiza wykazała, że przyczyną wysokoenergetycznych wstrząsów powodujących tąpnięcie w polu wschodnim mogło być przekroczenie naprężeń w warstwach piaskowcowych występujących nad pokładem 501, w pozostawionym pasie niewybranego górotworu między krawędziami w pokładzie 510, które są równoległe do wyrobisk prowadzonych w pokładzie 501. Kierunek pęknięcia w ogniskach pozostałych wstrząsów o niższych energiach w większości miał azymut również NE–SW oraz NW–SE i E–W.

Dla 12 zjawisk uzyskano typ ognisk o charakterze eksplozyjnym. Pełny tensor zawierał od 44 do 55% eksplozji, od 43 do 50% składowej jednoosiowego rozciągania oraz od 0,5 do 17% składowej ścinającej. Duży udział składowych eksplozyjnej i jednoosiowego rozciągania w mechanizmie tego typu ognisk wskazuje na dominację procesów eksplozyjnych w pokładzie na skutek nacisku warstw nadkładu.

Wyniki tej analizy zostały wykorzystane w ocenie warunków prowadzenia dalszej eksploatacji ściany I. W obawie wystąpienia następnych wstrząsów mogących skutkować tąpnięciami w tym rejonie, wybieg ściany I został skrócony.

Rysunek 4.1 przedstawia położenie oraz mechanizm ognisk (pełne rozwiązanie tensora momentu sejsmicznego) wstrząsów o energii $E \geq 1,0E+05$ J na tle wycinka mapy pokładowej.

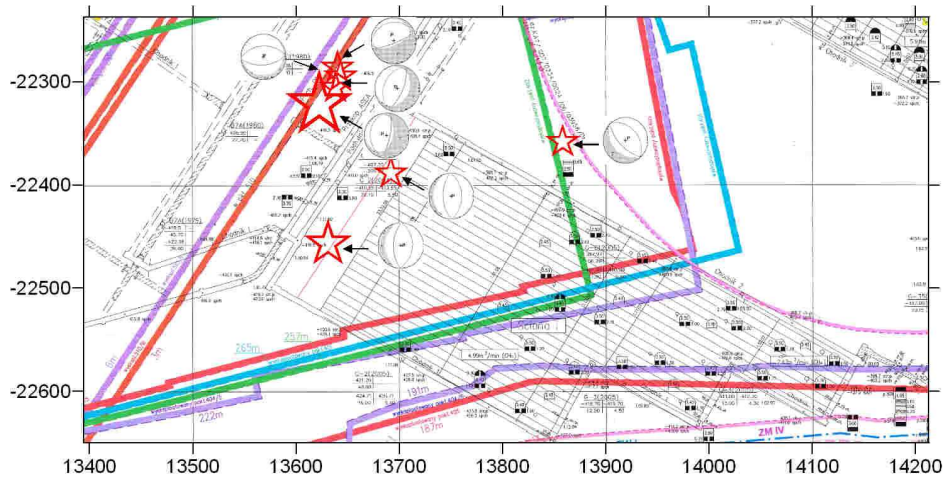
Tabela 4.1. Parametry mechanizmu ogniska wstrząsu z 23.02.2008 r.
Table 4.1. Parameters of the tremor source mechanism of 23 February 2008

Data 23.02.2008				Czas 19:30				Energia, J 8.0E+06				Współrzędne, m (układ. SG) 22457 -13631											
				Rozwiązanie pełne Mechanizm ścinający normalny								Rozwiązanie dziewiatoryczne Mechanizm ścinający normalny								Rozwiązanie ścinające Mechanizm ścinający normalny			
M_{ij}, Nm				M_{ij}, Nm				M_{ij}, Nm				M_{ij}, Nm											
-0,138E+13	-0,630E+12	0,682E+12		-0,139E+13	-0,564E+12	0,479E+14		-0,292E+12	-0,223E+12	0,168E+14		-0,292E+12	-0,223E+12	0,168E+14									
-0,630E+12	0,670E+12	-0,577E+14		-0,564E+12	0,845E+12	-0,308E+14		-0,223E+12	0,827E+12	-0,439E+14		-0,223E+12	0,827E+12	-0,439E+14									
0,682E+12	0,577E+14	-0,308E+15		0,706E+13	0,479E+14	0,544E+12		0,168E+13	0,439E+14	0,534E+12		0,168E+13	0,439E+14	0,534E+12									
M₀, Nm		M_T, Nm		M₀, Nm		M_T, Nm		M₀, Nm		M_T, Nm		M₀, Nm		M_T, Nm									
0,225E+15		0,317E+15		0,476E+14		0,484E+14		0,259E+13		0,164E+13		0,259E+13		0,164E+13									
I, %		CLVD, %		DC, %		I, %		CLVD, %		DC, %		I, %		CLVD, %		DC, %							
-19,7		-19,5		60,8		-		3		97		-		-		100							
ΦA, °	δA, °	ΦB, °	δB, °	ΦA, °	δA, °	ΦB, °	δB, °	ΦA, °	δA, °	ΦB, °	δB, °	ΦA, °	δA, °	ΦB, °	δB, °								
181	55	3	35	188	90	00	00	201	90	317	00	201	90	317	00								
ΦP, °	δP, °	ΦT, °	δT, °	ΦP, °	δP, °	ΦT, °	δT, °	ΦP, °	δP, °	ΦT, °	δT, °	ΦP, °	δP, °	ΦT, °	δT, °								
89	80	272	10	98	45	279	45	112	45	290	45	112	45	290	45								
Q, %		ERR, Nm		Q, %		ERR, Nm		Q, %		ERR, Nm		Q, %		ERR, Nm									
53		0,806+12		59		0,908E+12		65		0,110E+13		65		0,110E+13									

M_{ij} – składowe momentu sejsmicznego, M₀ – skalarny moment sejsmiczny, M_T – całkowity moment sejsmiczny, I – procentowy udział składowej izotropowej, CLVD – procentowy udział składowej odpowiadającej jednoosiowemu ściskaniu +/- lub rozciąganiu +/-, DC – procentowy udział składowej ścinającej, ΦA,B – azymut płaszczyzny A,B, δA,B – upad płaszczyzny A,B, ΦP,T – azymut osi P,T, δP,T – upad osi P,T, Q – współczynnik jakości rozwiązania, ERR - błąd składowych tensora

Tabela 4.2. Parametry mechanizmu ogniska wstrząsu z 13.02.2008 r.
Table 4.2. Parameters of the tremor source mechanism of 13 February 2008

Data 13.02.2008				Czas 06:07				Energia, J 5,0E+03				Współrzędne, m (układ. SG) 22334 -13591											
Rozwiązanie pełne Mechanizm ścinający normalny				Rozwiązanie dewiatoryczne Mechanizm ścinający normalny				Rozwiązanie ścinające Mechanizm ścinający normalny															
M_{ij}, Nm				M_{ij}, Nm				M_{ij}, Nm															
-0,505E+10		0,641E+12		0,149E+13		0,594E+11		0,482E+12		-0,149E+13		-0,238E+10		0,261E+12		-0,131E+13							
0,641E+12		0,609E+12		0,836E+13		0,482E+12		0,662E+12		0,421E+13		0,261E+12		0,752E+12		0,406E+13							
0,149E+13		0,836E+13		0,904E+14		-0,149E+13		0,421E+13		-0,722E+12		-0,131E+13		0,406E+13		-0,514E+12							
M₀, Nm		M_T, Nm		M₀, Nm		M_T, Nm		M₀, Nm		M_T, Nm		M₀, Nm		M_T, Nm									
0,645E+14		0,908E+14		0,433E+13		0,455E+13		0,433E+13		0,433E+13		0,433E+13		0,433E+13									
I, %		CLVD, %		DC, %		I, %		CLVD, %		DC, %		I, %		CLVD, %		DC, %							
49		49		2		-		-7		83		-		-		100							
ΦA, °		δA, °		ΦB, °		δB, °		ΦA, °		δA, °		ΦB, °		δB, °									
217		48		46		42		18		87		133		8		17		87		135		7	
ΦP, °		δP, °		ΦT, °		δT, °		ΦP, °		δP, °		ΦT, °		δT, °									
311		3		80		85		296		48		101		41		294		48		101		41	
Q, %		ERR, Nm		Q, %		ERR, Nm		Q, %		ERR, Nm		Q, %		ERR, Nm									
42		0,174E+12		48		0,169E+12		57		0,205E+12													

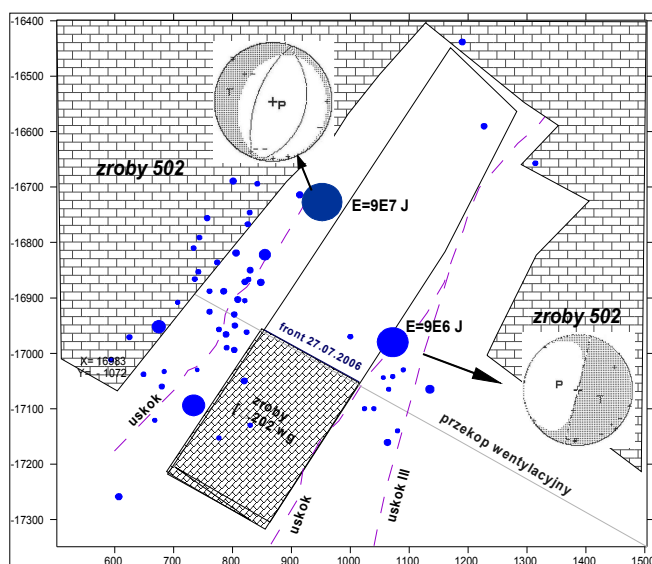


Rys. 4.1. Mechanizm ognisk wstrząsów o energii $E \geq 1,0E+05$ J na tle mapy pokładu 501/II
Fig. 4.1. Focal mechanism of tremors with energy $E \geq 1.0E+05$ J against the background of seam 501/II map

4.2. Mechanizm ognisk wstrząsów z kopalni Pokój

W dniu 27.07.2006 r. w kopalni Pokój wystąpił silny wstrząs sejsmiczny, który spowodował tąpnięcie w rejonie ściany 222 na poziomie 790. Wstrząs ten poprzedzony był

niską aktywnością sejsmiczną. Od rozpoczęcia biegu ściany w kwietniu 2006 r. do czasu wystąpienia wstrząsu i tąpnięcia zarejestrowano 52 wstrząsy o energii poniżej $1,0E+04$ J jeden wstrząs o energii $1,0E+05$ J i jeden o energii 10^6 J. Niska sejsmiczność oraz mała ilość wstrząsów w czasie biegu ściany 222, nie dawała podstaw do prognozy zjawiska z dnia 27.07.2006 r., na podstawie rejestracji kopalnianej sieci sejsmologicznej i oceny zagrożenia metodą sejsmologii górniczej. Na rysunku 4.2 przedstawiono mapę z naniesionymi ogniskami wstrząsów w czasie biegu ściany 222. Ogniska wstrząsów układały się głównie w pasie krawędzi poeksploatacyjnych i przebiegających tam uskoku, po obu skrzydłach parceli ściany 222. Tylko kilka pojedynczych i słabych energetycznie wstrząsów, miało miejsce w polu ściany 222. Większość wstrząsów układała się w linię wzdłuż biegu lokalnego uskoku w zachodnim skrzydle od parceli ściany 222 (uskok wygaszający się w rejonie wstrząsu z dnia 27.07.2006 r., o początkowym zrzucie 7,5 m, pokrywający się ze śladem krawędzi pokładu 506). Kolejna duża grupa wstrząsów lokalizowała się z kolei we wschodnim skrzydle od parceli ściany 222, w obszarze, w którym następuje łączenie się lokalnego uskoku o zrzucie 5 m z dużym regionalnym uskokiem III o zrzucie 30 m. Z reguły w takich miejscach, niezależnie od naprężeń eksploatacyjnych, występują duże naprężenia tektoniczne.



Rys. 4.2. Położenie ognisk oraz mechanizm dwóch wysokoenergetycznych wstrząsów na tle wycinka mapy pokładowej

Fig. 4.2. The location of tremor sources and mechanism of two high energy tremors against a background of the coal seam map section

W celu określenia przyczyny zaistnienia tych wysokoenergetycznych wstrząsów z dnia 15.07.06 r. o energii $E = 9,0E+06$ J J oraz wstrząsu z dnia 27.07.06 r. o energii $E = 9,0E+07$ J, obliczono mechanizmu ich ognisk. Obydwa wstrząsy miały bardzo zbliżone rozwiązanie i charakteryzowały się mechanizmem poślizgowym normalnym (rys. 4.2). Płaszczyzny nodalne miały azymutem NE–SW. Ogólnie mechanizm ognisk zawiera około 20% składowej implozyjnej, około 10% składowej jednoosiowego ściskania oraz około 70% składowej ścinającej. Można przyjąć, że mechanizmu ognisk odzwierciedlał wpływ stref uskoku

z rejonu ściany 222. Wstrząs z dnia 15.07.2006 r. charakteryzował się azymutem płaszczyzny pęknięcia $15^\circ(\pm 20^\circ)$, i można go skorelować z rozciągłością uskoków zlokalizowanych po wschodniej stronie ściany 222. Wstrząs z dnia 27.07.2006 r. charakteryzował się azymutem płaszczyzny pęknięcia $25^\circ(\pm 20^\circ)$, i można go skorelować z rozciągłością uskoku zlokalizowanego po zachodniej stronie ściany 222. Analiza ta wykazała więc, że zmiany naprężeniowo-deformacyjne nie zachodziły w obrysie pola ściany 222, a w obszarach zlokalizowanych w pasie krawędzi poeksploatacyjnych i przebiegających uskoków, po obu skrzydłach parceli eksploatowanej ściany 222.

4.3. Przykład wysokoenergetycznych wstrząsów o charakterze regionalnym

W 2007 i 2008 roku pod miastem Bytom wystąpiły dwa wysokoenergetyczne wstrząsy, które nie spowodowały skutków na dole w kopalni ale wywołały uszkodzenia w kilkudziesięciu budynkach w Bytomiu (spadanie pojedynczych dachówek i uszkodzenia kominów) i były silnie odczute na dużym obszarze w promieniu do 12 km.

Obliczenia mechanizmu ognisk tych wstrząsów przeprowadzone w celu zbadania ich genezy wykazały, że w otrzymanym rozwiązaniu zdecydowanie dominowała składowa ścinania (91,2 % i 87 % – odpowiednio dla pierwszego i drugiego wstrząsu), nad eksplozją – tylko (3,0 % i 10 %) i jednoosiowym ściskaniem (6 % i 9 %). Dla obu wstrząsów był to mechanizm typu uskoku odwróconego. Płaszczyzny nodalne miały azymut NW–SE. Naprężenia główne ściskające P były prawie poziome i charakteryzowały się azymutem zbliżonym do kierunku NE – NW a naprężenia rozciągające T były zbliżone do pionowych i miały azymut odpowiadający kierunkowi NW – SE. Tabele 4.3 i 4.4 przedstawiają wyniki obliczeń. Analizując mechanizm ognisk tych wstrząsów w aspekcie badań prowadzonych przez Tepera (1998) dotyczących modelu sejsmotektonicznego północnej części GZW można stwierdzić, że układ naprężeń działających w ognisku wstrząsów i naprężeń determinujących stan odkształceń górotworu uformowany podczas najmłodszej orogenezy, wynikający z analizy strukturalnej, cechują się wzajemnym podobieństwem. Mianowicie jak widać z rysunku 4.3 przedstawiającego model naprężeniowy GZW, uzyskany z rozwiązania mechanizmu ognisk kierunek naprężeń ściskających P odpowiada kierunkowi kompresji K, a kierunek naprężeń rozciągających T kierunkowi tensji T. Ponadto kierunek uskoków rewersyjnych jest zbliżony do azymutów płaszczyzn nodalnych określonych w rozwiązaniu mechanizmu ognisk. Mając na uwadze wyżej przedstawione zależności, można hipotetycznie wnioskować, że rozwiązanie mechanizmu ognisk odzwierciedla układ naprężeń rezydualnych bądź neotektonicznych występujący w głębokich strukturach GZW. Za główne współczesne struktury sejsmogeniczne uznano nieciągłości cokołu krystalicznego przebiegających subrównoleżnikowo stref granicznych drugiego rzędu między segmentami masywu górnośląskiego zwanymi blokami: Tarnowskich Gór, Bytomia i centralnym. Na północy jest to nieciągłość pod osią synkliny Bytomia a na południu nieciągłość w rejonie uskoku kłodnickiego (Teper 198).

Tabela 4.3. Parametry mechanizmu ogniska wstrząsu z 9.02.2007 r.
Table 4.3. Parameters of the tremor source mechanism of 9 February 2007

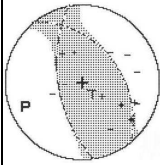
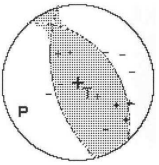
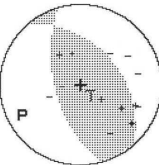
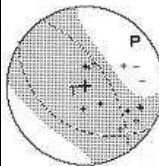
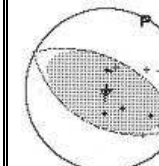
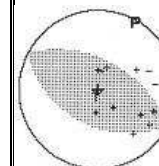
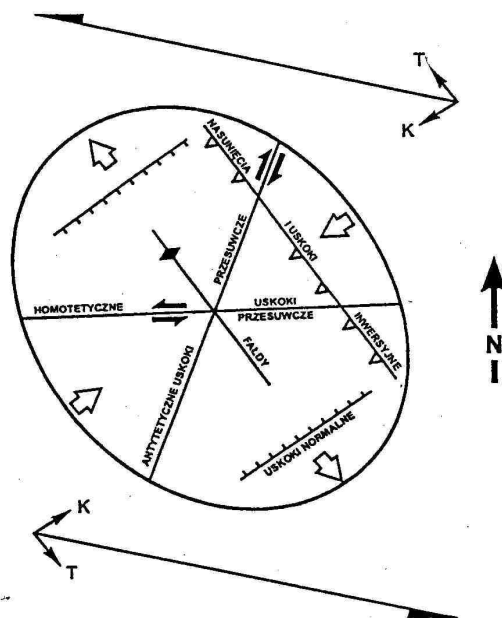
Data 2007-02-09		Czas 14:45		Energia, J 1.0E+09		Współrzędne, m (układ SG) X: 6420 Y: 50									
 Rozwiązanie pełne Mechanizm ścinający odwrócony		 Rozwiązanie dewiatoryczne Mechanizm ścinający odwrócony		 Rozwiązanie ścinające Mechanizm ścinający odwrócony											
M_{ij} , Nm		M_{ij} , Nm		M_{ij} , Nm											
-0,295E+13 -0,892E+14 -0,192E+14		-0,333E+14 -0,941E+14 -0,128E+14		-0,379E+14 -0,922E+14 -0,139E+14											
-0,892E+14 -0,165E+15 0,808E+14		-0,941E+14 -0,162E+15 0,823E+14		-0,922E+14 -0,158E+15 0,815E+14											
-0,192E+14 0,808E+14 0,191E+13		-0,128E+14 0,823E+14 0,196E+15		-0,139E+14 0,815E+14 0,196E+15											
M_o , Nm		M_T , Nm		M_o , Nm		M_T , Nm		M_o , Nm		M_T , Nm					
0,193E+15		0,216E+15		0,218E+15		0,221E+15		0,218E+15		0,218E+15					
I, %		CLVD, %		DC, %		I, %		CLVD, %		DC, %					
-3		-6		91		-		-		100					
ΦA , °		δA , °		ΦB , °		δB , °		ΦA , °		δA , °		ΦB , °		δB , °	
171		56		320		38		165		56		318		38	
ΦP , °		δP , °		ΦT , °		δT , °		ΦP , °		δP , °		ΦT , °		δT , °	
248		9		127		72		244		9		119		74	
Q, %		ERR, Nm		Q, %		ERR, Nm		Q, %		ERR, Nm		Q, %		ERR, Nm	
55		0,185+14		62		0,184+14		68		0,185+14		68		0,185+14	

Tabela 4.3. Parametry mechanizmu ogniska wstrząsu z 19.12.2008 r.
Table 4.4. Parameters of the tremor source mechanism of 19 December 2008

Data 2008-12-19		Czas 23:45		Energia, J 7.0E+08		Współrzędne, m (układ SG) 6620 -380									
 Rozwiązanie pełne Mechanizm ścinający odwrócony		 Rozwiązanie dewiatoryczne Mechanizm ścinający odwrócony		 Rozwiązanie ścinające Mechanizm ścinający odwrócony											
M_{ij} , Nm		M_{ij} , Nm		M_{ij} , Nm											
0,558E+14 -0,311E+15 -0,100E+15		-0,836E+15 -0,401E+15 -0,140E+15		-820E+15 -0,430E+15 -0,134E+15											
-0,311E+15 -0,331E+14 -0,324E+15		-0,401E+15 -0,281E+15 -0,675E+14		-0,430E+15 -0,226E+15 -0,680E+14											
-0,100E+15 -0,324E+15 -0,954E+14		-0,140E+13 -0,675E+14 0,112E+16		-0,134E+15 -0,680E+14 0,105E+16											
M_o , Nm		M_T , Nm		M_o , Nm		M_T , Nm		M_o , Nm		M_T , Nm					
0,814E+15		0,818E+15		0,106E+16		0,109E+16		0,317E+14		0,317E+14					
I, %		CLVD, %		DC, %		I, %		CLVD, %		DC, %					
10		3		87		-		-		100					
ΦA , °		δA , °		ΦB , °		δB , °		ΦA , °		δA , °		ΦB , °		δB , °	
326		58		123		34		298		50		118		40	
ΦP , °		δP , °		ΦT , °		δT , °		ΦP , °		δP , °		ΦT , °		δT , °	
47		12		270		73		28		4		206		86	
Q, %		ERR, Nm		Q, %		ERR, Nm		Q, %		ERR, Nm		Q, %		ERR, Nm	
62		0,708+14		68		0,717+14		69		0,747+14		69		0,747+14	



Rys. 4.3. Schematyczna reprezentacja przestrzennego rozkładu zespołu deformacji charakterystycznego dla reżimu utrzymującego się od górnego karbonu przez fazy alpejskie do ruchów współczesnych w GZW w zachodniej części obszaru badań (strefa tektoniki blokowej) i powstającego we wschodniej części badań (strefa tektoniki fałdowo-blokowej) w alpejskim, neotektonicznym i współczesnym polu naprężeń (Teper, 1998)

Fig. 4.3. Schematic representation of spatial distribution of deformation complex characteristic for the regime remaining from the Upper Carboniferous through Alpine phases to contemporary movements in the Upper Silesian Coal Basin in the western part of the investigation area (block tectonics zone) and arising in the eastern part of investigations (fold-block tectonics zone) in the Alpine, neotectonic and contemporary stress field (Teper, 1998)

5. Podsumowanie

Mechanizmu ogniska wstrząsu odzwierciedla układ sił równoważnych generujących takie przemieszczenia w punktach obserwacyjnych, które są zgodne z tymi jakie wywołują siły rzeczywiste działające w ognisku. Obecnie najlepszym modelem ognisk wstrząsów jest model oparty o tensor momentu sejsmicznego. Moment sejsmiczny jest iloczynem wartości sił działających w ognisku punktowym i odległości między punktami ich przyłożenia. Oblicza się trzy rodzaje tensora momentu sejsmicznego, które określają trzy modele ogniska wstrząsu:

- ognisko zawierające składową izotropową, składową odpowiadającą jednoosiowemu ściskaniu lub rozciąganiu oraz składową ścinającą,
- ognisko posiadające składową odpowiadającą jednoosiowemu ściskaniu lub rozciąganiu i składową ścinającą,
- ognisko w którym zachodzą procesy czystego ścinania.

Przeprowadzone badania mechanizmu ognisk wstrząsów metodą inwersji tensora momentu sejsmicznego, w kilkunastu kopalniach GZW, wskazują na możliwość uzyskiwania nowych informacji o procesach destrukcji górotworu naruszonego eksploatacją górnictwem. Stwierdzono wyraźną zmienność mechanizmów ognisk wstrząsów w zależności od położenia ogniska wstrząsu względem frontu ścianowego i istniejących zasłóści eksploatacyjnych oraz cech tektonicznych rejonu.

Wydzielono dwa rodzaje sejsmiczności tzw. górniczej i górniczo-tektonicznej. Pierwszy typ zjawisk bezpośrednio związany jest z prowadzoną działalnością górnictwem, występuje w sąsiedztwie czynnych wyrobisk górniczych. Są to zjawiska słabsze energetycznie i charakteryzują w większości eksplozywnym typem mechanizmu ognisk.

Drugi typ sejsmiczności górniczo-tektonicznej powstaje w wyniku połączenia naprężeń eksploatacyjnych i rezydualnych występujących w głębokich strukturach GZW. Są to wstrząsy wysokoenergetyczne, występujące w rejonach stref tektonicznych, często odczuwalne przez ludność na powierzchni. Najczęstszym typem mechanizmu ognisk tych wstrząsów jest mechanizm ścinający. Azymut i upad płaszczyzn pękania w ognisku korelują się z rozciągłością i upadem uskoku, w pobliżu których wstrząsy te wystąpiły.

Przeprowadzone badania wskazują, że obserwacje zmienności mechanizmu ognisk wstrząsów górniczych korelowane z czynnikami geologiczno-górnictwem w rejonie eksploatacji, mogą stanowić efektywny prekursor w zakresie zmian stanu naprężeniowo-deformacyjnego w obrębie warstw wstrząsogennych.

Literatura

- [1] Aki K., Richards P.G. 1980: Quantitative Seismology - Theory and Methods, vol. 1,2, W.H. Freeman and Co., San Francisco.
- [2] Backus G., Mulcahy M. 1976: Moment tensor and other phenomenological description of seismic sources, *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 46, 341-361.
- [3] Byerly P. 1926: The Montana earthquake of June 28,1925, *Bull. Seismol. Soc. Am* vol. 16, 209-269.
- [4] Dubiński J., Mutke G., Stec K. 1999: Rozwiązania w sejsmologii górniczej poprawiające efektywność oceny stanu zagrożenia tąpnięciami. *Geologia*, T.25, Wyd. AGH, Kraków, 45-58
- [5] Dubiński J., Stec K. 2001: Relationship between focal mechanism parameters of mine tremors and local strata tectonics. W: *Dynamic rock mass response to mining*. Red. G. Van Aswegen, R.J. Durrheim W.D. Ortle The South African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, 113-118.
- [6] Feignier B., Young R. 1992: Moment tensor inversion of induced microseismic events: Evidence of non-shear failures in the $-4 < M < -2$ moment magnitude range. *Geophys. Res. Lett.* 19, 1503-1506.
- [7] Gadowska B. 1982: The Mechanism of Earthquakes - a review of the graphical representation of fault-plane solutions. Institute of Seismology, University of Helsinki, Report S-6.
- [8] Gibowicz S. J., Wiejacz P. 1994: A search for the source non-shearing components of seismic events induced in Polish coal mines, *Acta Geophys. Pol.*, 42, 81-110.
- [9] Gilbert F. 1970: Excitation of the normal modes of the Earth by earthquake sources. *Geoph. J. R. Astr. Soc.* 22, 223-226.
- [10] Hodgson J.H., Allen J.F.J. 1954: Tables of extended distances for PKP, *Publ. Dom. Obs.*, vol.16, No 10. 329-348.
- [11] Knopoff L. 1970: Analytical calculation of fault plane problem, In: J. Hodgson (ed.) *A symposium on earthquake mechanism*, Ottawa, 309-316.
- [12] McGarr A. 1992: An implosive component in the seismic moment tensor of a mining-induced tremor. *Geophys. Res. Lett.* 19, 1579-1582.
- [13] Pearce R. G. 1977: Fault plane solution using relative amplitudes of P and pP. *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, vol.50, 381-394.

- [14] Randall M.J. 1971: The spectral theory of seismic sources, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 63, 1133-1144.
- [15] Sato K., Fujii Y., Isijima Y., Kinoshita S. 1985: Microseismic activity induced by longwall coal mining. *Proceeding of 4th Conf. on Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials*, October 22-24, 1985, Trans. Tech. Publications.
- [16] Stec K. 2005: Charakterystyka mechanizmu ognisk wstrząsów górniczych z Obszaru Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. *Wiadomości Górnicze* 4/2005, 168-174.
- [17] Stec K., 2007: Characteristics of Seismic Activity of the Upper Silesian Coal Basin in Poland. *Geophysical Journal International*, Blackwell Publishing Ltd, V 168, 757-768.
- [18] Stec K., Błaszczak E. 2008: Charakterystyka procesów zachodzących w ogniskach wysokoenergetycznych wstrząsów występujących w czasie eksploatacji ściany 17 w pokładzie 361 w KWK „Knurów”. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi Tom 24 – Zeszyt 2/3*, Wyd. Sigma PAN, Kraków, str. 226-244.
- [19] Stec K., Drzewiecki J. 2000: Relationship between mine tremor focal mechanism and local mining and geological conditions. *Acta Montana A*, No. 16 (118), 189-202.
- [20] Teper L. 1998: Wpływ nieciągłości podłoża karbonu na sejsmotektonikę północnej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. *Wyd. Uniw. Śląskiego, Katowice*.
- [21] Wiejacz P. 1994: The SMT software. PAN, Warszawa, praca niepublikowana.
- [22] Wiejacz P. 1995: Moment tensor for seismic events from Upper Silesian coal mine, Poland, In *Mechanics of Jointed and Faulted Rock*, (H-P. Rossmanith, ed.), Balkema, Rotterdam, 667-672.
- [23] Zuberek W.M., Teper L., Idziak A.F., Sagan G. 1996: Tectonophysical approach to the description of mining induced seismicity in the Upper Silesia. W: *Tectonophysics in Mining Areas*. Red A. Idziak, *Wyd. Uniw. Śl., Katowice*, 79-98.
- [24] Zuberek W.M., Teper L., Idziak A.F., Sagan G. 1997: Seismicity and tectonics in the Upper Silesian Coal Basin, Poland. W: *proc. XIII Int. Cong. of Carboniferous – Permian*. *Prace Państw. Inst. Geol., Kraków*, 157, 199-207.

The focal mechanism and the methods of its calculation

Key words

seismic tremors, source mechanism, seismic moment tensor

Summary

The Upper Silesian Coal Basin is an area very prone to various deformations which result from both the past and current coal mining and also are the source of high energy mine tremors. This high seismic activity is a significant risk to underground mine workings and also causes discomfort and arduousness for residents as well as damage to surface infrastructure. To understand the nature of this seismicity, an investigation into the mine tremor source mechanism is conducted to understand the processes which occur during the tremors. In the article the method of mine tremor source mechanism examination is presented, together with exemplary results. Following the studies on the origin of seismic events, which have been carried out for several years, two types of mine tremors were distinguished. The first is directly coupled to the current mining operation, with the sources located in coal seams or the roof strata, the second appears to be of regional character, with the sources connected to the geological and tectonic structures, including the zones of natural stress concentrations and the zones of ground weakness in the form of tectonic structures and various kinds of fractures. The example of the tremors coupled to the current mining operation are the events which caused the rockburst in the Staszic and Pokój mine. The example of the latter group of events are the highly energetic tremors from Bobrek-Centrum mine.