

Krystyna Stec*, Łukasz Wojtecki**

CHARAKTERYSTYKA MECHANIZMU OGNISK WSTRZĄSÓW GÓROTWORU ZWIĄZANYCH Z EKSPLOATACJĄ POKŁADU 510 ŚCIANĄ 502 W KOPALNI WĘGLA KAMIENNEGO „BIELSZOWICE”

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki analizy mechanizmu ognisk wstrząsów o energii $E \geq 1,0E + 05$ J i o energii mniejszej od $1,0E + 05$ J, powstałych w wyniku eksploatacji ściany 502 w pokładzie 510 w kopalni „Bielszowice”. Przeprowadzona analiza wykazała możliwość udokładnienia informacji dotyczących pionowej lokalizacji ognisk wstrząsów.

Stwierdzono występowanie dwóch grup wstrząsów: pierwszą grupę stanowiły wstrząsy występujące w warstwach piaskowcowych zalegających nad pokładem 510, które charakteryzowały się mechanizmami poślizgowymi o azymutach płaszczyzn pęknięcia zbliżonych do rozciągłości frontu eksploatacyjnego. Druga grupa to wstrząsy związane z eksploatowanym pokładem lub bezpośrednim jego otoczeniem. Zjawiska te charakteryzowały się mechanizmem zarówno poślizgowym, jak i mechanizmem z dużym udziałem składowej eksplozyjnej. Informacje o procesach pęknięcia zachodzących w ogniskach wstrząsów pozwalają na odtworzenie sposobu destrukcji górotworu, co umożliwia lepszą ocenę zagrożenia tąpniętami w danym polu eksploatacyjnym.

Characteristics of the mine tremor source mechanism associated with the mining in the seam 510, the longwall 502 in the "Bielszowice" Coal Mine

Abstract

The article presents the results of the analysis of the mine tremor source mechanism with energy $E \geq 1.0E + 05$ J and with energy less than $1.0 E + 05$ J, resulting from the mining in the longwall 502 in the seam 510 of Bielszowice mine. The undertaken analysis showed the possibility of refinement of the information regarding the vertical location of the tremor source .

Two groups of shocks have been identified: the first group has been consisted of shocks occurring in the layers of sandstone lying above the seam 510, which have been characterized by the slipping mechanisms with azimuths of craking planes close to the extent of the exploitation front. The second group of shocks has been related to seam or its direct surrounding. These phenomena have been characterized by both the sliding mechanism and the mechanism involving a large explosive component. The information concerning the processes of cracking occurring at tremor source allows to reconstruct the way of rock mass destruction, which allows to prepare the better evaluation of rock burst hazard in a particular mining field.

1. WPROWADZENIE

Źródłem wysokoenergetycznych wstrząsów górniczych i tąpnięć w Górnśląskim Zagłębiu Węglowym są najczęściej pękające warstwy stropowe podbierane eksploatacją ścianową, która powoduje powstawanie w warstwach nadległych obszarów cha-

* Główny Instytut Górnictwa

** KW SA Kopalnia Węgla Kamiennego „Bielszowice”

rakteryzujących się zwiększonym stanem naprężeń, a w efekcie ich pękanie połączone z emisją energii, w tym energii sejsmicznej. Proces pęknięcia skał w ognisku można określić na podstawie parametrów opisujących mechanizm ognisk wstrząsów, wyznaczonych metodą inwersji tensora momentu sejsmicznego, opartą na analizie fal sejsmicznych wygenerowanych w ognisku wstrząsu i zarejestrowanych przez odpowiednią liczbę sejsmometrów, równomiernie rozmieszczonych względem ogniska wstrząsu. Mechanizm powstawania wstrząsów górotworu zależy od wielu czynników geologiczno-górnictwowych, których korelacja ma decydujący wpływ na powstawanie różnego rodzaju ognisk wstrząsów.

Badania mechanizmu ognisk wstrząsów górotworu wykonano dla wstrząsów zarejestrowanych w czasie eksploatacji ściany 502 w pokładzie 510 w kopalni „Bieliszowice”. Eksploatacji tej towarzyszyła wysoka aktywność sejsmiczna, co przejawiało się występowaniem wstrząsów wysokoenergetycznych o energii sejsmicznej większej niż 10^5 J, jak również bardzo licznymi zjawiskami o niższej energii. Zasadniczą częścią wykonywanych badań było powiązanie otrzymanywanych rodzajów mechanizmu ognisk wstrząsów z lokalnymi warunkami górnictwowymi. Przeprowadzono wnikliwą analizę, na podstawie której określono prawdopodobny sposób procesu naruszania struktury skał stropowych. Stwierdzono wyraźną zmienność mechanizmów ognisk wstrząsów w zależności od położenia ich hipocentrow. Wykorzystując program FOCI (Kwiatek 2009) oceniono głębokość występowania ognisk. Lokalizację pionową określono na podstawie współczynników jakości rozwiązań i błędów wyznaczenia składowych tensora. Wydzielono dwie grupy wstrząsów różniące się głębokością występowania ognisk oraz mechanizmem ognisk. Jedną grupę zjawisk występowała w odległości od około 50 do 100 m od pokładu 510 w rejonie zalegania grubych ławic piaskowca. Mechanizm ognisk wstrząsów w przypadku rozwiązania pełnego tensora zawierał średnio do 20% implozji, do 20% składowej jednoosiowego rozciągania oraz od 50 do 80% składowej ścinającej, powodującej procesy ścinania na uskoku normalnym lub odwróconym. Ten typ zjawisk powstawał w następstwie pęknięcia warstw piaskowca. Drugą grupę stanowiły zjawiska zlokalizowane na głębokości występowania stropu bezpośredniego lub na głębokości zalegania pokładu 510. W tym zbiorze występowały dwa typy mechanizmu ognisk. Jeden typ stanowiły ogniska o mechanizmie poślizgowym normalnym z płaszczyzną pęknięcia przebiegającą równoległą do azymutu frontu. Wstrząsy o tym typie mechanizmu mogły występować w wyniku pęknięcia warstw stropu bezpośredniego. Drugim zjawiskiem były wstrząsy o dużym udziale składowej nieścinającej, eksplozywnej, związane z procesami destrukcyjnymi zachodzącymi w pokładzie. W przypadku wstrząsów o mechanizmie eksplozywnym rozwiązanie pełnego tensora zawierało średnio 40% eksplozji, 40% składowej jednoosiowego ściskania oraz bardzo mały udział składowej ścinającej (ok. 20%).

2. WARUNKI GEOLOGICZNO-GÓRNICZE

Budowa geologiczna oraz zaszcłości eksploatacyjne w istotny sposób determinują poziom aktywności sejsmicznej indukowanej prowadzoną eksploatacją górnictwową. W przypadku budowy geologicznej, zdecydowanie najbardziej niekorzystnym czynni-

kiem jest obecność w sąsiedztwie pokładu grubych kompleksów skał o dużej wytrzymałości i sztywności, głównie piaskowców. Odległość wstrząsogennej warstwy sztywnych skał od eksploatowanego pokładu ma również istotne znaczenie. Drugim niekorzystnym czynnikiem geologicznym jest występowanie zaburzeń, głównie uskoków, w pobliżu których występuje podwyższony stan naprężeń. Do niekorzystnych czynników górniczych należy również występowanie krawędzi eksploatacyjnych pokładów sąsiednich – szczególnie w bliskiej odległości od eksploatowanego pokładu.

W kopalni „Bielszowice” na szeroką skalę jest prowadzona eksploatacja pokładów węgla zagrożonych tapaniami. Pokłady te w przeważającej większości – w tym także pokład 510 – zostały zakwalifikowane do trzeciego, czyli najwyższego stopnia zagrożenia tapaniami.

Ściana 502 była prowadzona w warstwie przystropowej pokładu 510. Głębokość zalegania pokładu 510 w tym rejonie wynosi maksymalnie –880 m, a miąższość pokładu 510 zawiera się w przedziale od 7,20 do 9,00 m. W spągu pokładu 510 występuje łupek ilasty, przechodzący lokalnie w łupek piaszczysty, pod którym występuje piaskowiec.

W rejonie wyeksploatowanej ściany 502 strop pokładu 510 jest wykształcony w postaci łupków ilastych, przechodzących w łupki piaszczyste. Lokalnie występuje piaskowiec. Sumaryczna miąższość łupków i piaskowców występujących w stropie bezpośrednim jest mała i nie przekracza 13 m. Bezpośrednio nad pokładem 510 nie występuje gruba, wstrząsogenna warstwa piaskowca. Warstwa taka – o miąższości około 18 m – występuje między pokładami 503 i 504, w odległości około 75 m nad pokładem 510.

Na końcowym odcinku wybiegu ściany 502 występowały zaburzenia typu uskowego. Uskoki te miały nachylenie od 10 do 80° oraz zrzuty od 1 do 7 m.

W rejonie ściany 502 były wybierane pokłady 501, 502, 506 i 507 zalegające odpowiednio 140, 126, 45 i 10–13 m nad pokładem 510. Parcele wybrane w pokładach 501, 502 i 506 mają kształt nieregularny, w związku z czym na wybiegu ściany 502 występowały krawędzie tych pokładów. Pokład 507 nad polem ściany 502 został wybrany w całości.

W opisywanej partii złoża pozostawiono filary dla przekopów głównych i skrzydłowych, w których występował podwyższony stan naprężeń. Bieg ściany 502 rozpoczął się w rejonie filara ochronnego dla przekopów skrzydłowych, a kończył w rejonie filara ochronnego dla przekopów głównych. Ponadto, ściana 502 była prowadzona wzdłuż zrobów wyeksploatowanej wcześniej ściany 500, z pozostawionym płotem węglowym o szerokości do 5 m.

Podsumowując, na powstawanie wstrząsów w rejonie ściany 502 mogły mieć wpływ różnorodne czynniki geologiczne i górnicze, a mianowicie:

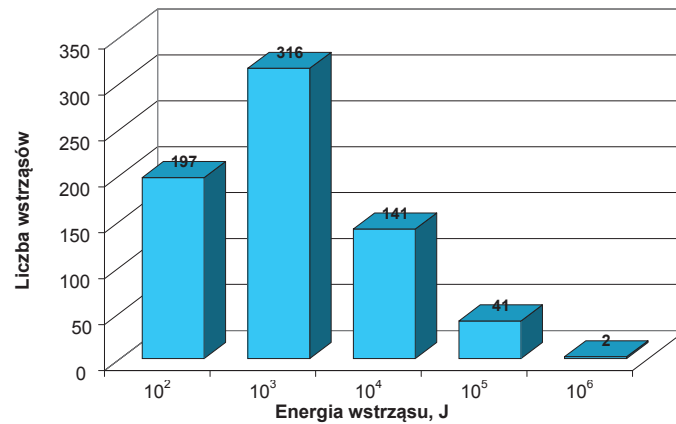
- destrukcja grubych warstw piaskowców zalegających nad pokładem 503 i 504,
- naruszenie równowagi naprężeniowej w filarach ochronnych dla przekopów głównych i skrzydłowych,
- ujemne oddziaływanie zrobów wyeksploatowanej wcześniej ściany 500,
- rozładowanie energii sprężystej zakumulowanej w piaskowcach zalegających pod pokładem 510,

- występowanie na wybiegu ściany 502 krawędzi pokładów 501, 502 i 506,
- obecność na końcowym odcinku wybiegu ściany 502 strefy uskokuwej.

3. AKTYWNOŚĆ SEJSMICZNA W REJONIE ŚCIANY 502

Sieć sejsmologiczna kopalni „Bielszowice” obejmuje swym zasięgiem wszystkie zagrożone tąpnięciami rejony kopalni. Umożliwia ona rejestrację wstrząsów górotworu o energii od $1 \cdot 10^2$ J oraz lokalizację ognisk wstrząsów o energii od $1 \cdot 10^3$ J.

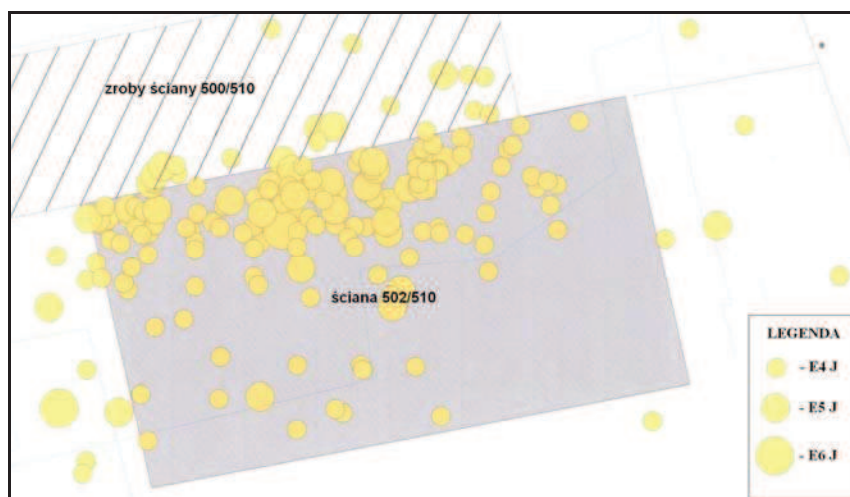
Podczas eksploatacji pokładu 510 ścianą 502, w jej rejonie zarejestrowano w sumie 697 wstrząsów górotworu o sumarycznej energii $3,19 \cdot 10^7$ J, w tym 197 wstrząsów o energii rzędu 10^2 J, 316 wstrząsów o energii 10^3 J, 141 wstrząsów o energii 10^4 J, 41 wstrząsów o energii 10^5 J oraz 2 wstrząsy o energii 10^6 J (rys. 1).



Rys. 1. Aktywność sejsmiczna w rejonie ściany 502 w pokładzie 510

Fig. 1. The seismic activity in the region of the longwall 502 in the seam 510

Epicentra przeważającej większości średnio- i wysokoenergetycznych wstrząsów znajdowały się w rejonie górnego odcinka ściany 502, przy zrobach ściany 500, co przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Epicentra średnio- i wysokoenergetycznych wstrząsów w rejonie ściany 502

Fig. 2. The epicenters of medium and high-energy shocks in the region of the longwall 502

4. PODSTAWY METODY OKREŚLANIA MECHANIZMU OGNISK WSTRZĄSÓW

Ważnym osiągnięciem w sejsmologii górniczej jest możliwość tworzenia sejsmologicznych modeli i mechanizmów ognisk wstrząsów górotworu spowodowanych eksploatacją górnictwem (Stec 2005). Jego podstawą jest ukierunkowana interpretacja sejsmogramów wstrząsów. Wstrząsy są rezultatem działania określonych systemów sił na pewien fragment górotworu, w którym zostaje zainicjowane ognisko wstrząsu. Odpowiednio zorientowane w przestrzeni systemy sił determinują ściśle określone dla nich przebiegi procesów dynamicznych (Wiejacz 2001). Procesy te są źródłem promieniowania sejsmicznego o ściśle określonej charakterystyce. Sejsmogramy zawierają zatem informacje o układzie sił działających w ognisku wstrząsu, a także o przebiegu zachodzącego w nim procesu dynamicznego. Źródła sejsmiczne są powszechnie opisywane za pomocą modelu sił równoważnych, odpowiadających liniowym równaniom falowym, z pominięciem efektów nieliniowych w obszarze źródła. Siły równoważne definiuje się jako układ sił generujących przemieszczenia górotworu w danym punkcie obserwacji, identyczne z przemieszczeniami wywołanymi siłami rzeczywistymi działającymi w ognisku (Gibowicz 1995). W przypadku trzęsień ziemi, w ogniskach dominują procesy ścinania na płaszczyznach uskoków, opisywane za pomocą podwójnej pary sił (Gibowicz 1995). W przypadku wstrząsów górotworu spowodowanych eksploatacją górnictwem możliwe są, oprócz dominujących procesów ścinania na płaszczyznach uskoków, również inne mechanizmy ognisk, np. mechanizmy eksplozyjne czy implozyjne (Marczak, Zuberek 1994).

Do określania mechanizmów ognisk wstrząsu górotworu jest stosowana metoda inwersji tensora momentu sejsmicznego. Tensor ten opisuje układ sił występujących w źródle sejsmicznym jako liniową kombinację par sił z momentem. Źródło sejsmicz-

ne jest opisywane w sposób zupełny i jest to najpełniejszy opis systemu sił występujących w ognisku wstrząsu (Backus, Mulcahy 1976).

Przemieszczenia górotworu w polu dalekim u_k , wywołane przez system sił występujących w źródle sejsmicznym, są sumą przemieszczeń wywołanych przez poszczególne pary sił (Aki, Richards 1980). Można to zapisać następująco

$$u_k = M_{ij} \frac{\partial G_{ki}}{\partial x_j} = M_{ij} * G_{ki,j} \quad (1)$$

gdzie:

M_{ij} – moment pary sił działającej w kierunku osi x_i , o ramieniu zgodnym z osią x_j ,

G_{ki} – funkcja Greena (funkcja opisująca odpowiedź impulsową ośrodka na drodze przebytej przez falę sejsmiczną),

$G_{ki,j}$ – pochodna funkcji Greena względem współrzędnej po przecinku w indeksie,
* – konwolucja.

W metodzie inwersji tensora momentu sejsmicznego zakłada się punktowy charakter źródła (rozmiary źródła są małe w porównaniu do obserwowanych długości fal sejsmicznych) oraz przyjmuje się, że wszystkie składowe tensora momentu zależą w taki sam sposób od czasu (wprowadza się funkcję źródła). W takim przypadku ma się do czynienia ze źródłem synchronicznym, czyli generującym jednakowe zmiany w czasie we wszystkich kierunkach. Pole przemieszczeń można wówczas zapisać jako

$$u_k(x, t) = M_{ij} [G_{ki,j} * s(t)] \quad (2)$$

gdzie $s(t)$ – funkcja źródła (funkcja charakteryzująca emisję sejsmiczną ze źródła w czasie).

Pole przemieszczeń u_k jest liniową funkcją składowych tensora momentu sejsmicznego oraz wyrazów w nawiasie kwadratowym. Przyjmując, że funkcja źródła jest funkcją Diraca, pole przemieszczeń u_k można opisać w następujący sposób

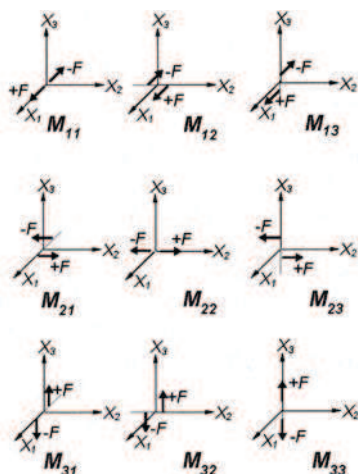
$$u_k(x, t) = M_{ij} G_{ki,j} \quad (3)$$

Zbiór wszystkich dziewięciu składowych M_{ij} zapisany w postaci macierzy \mathbf{M} o wymiarze 3×3 reprezentuje tensor momentu sejsmicznego

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Składowe diagonalne, czyli takie, dla których $i = j$ opisują pary sił bez momentów, skierowane wzdłuż odpowiednich osi układu współrzędnych.

Tensor momentu sejsmicznego można również przedstawić w sposób graficzny jako układ dziewięciu par sił równoważnych M_{ij} działających w ognisku wstrząsu (rys. 3).



Rys. 3. Układ dziewięciu par sił równoważnych M_{ij} działających w ognisku wstrząsu
Fig. 3. The arrangement of nine pairs of equivalent forces M_{ij} functioning at the tremor source

Tensor momentu sejsmicznego można rozłożyć na część izotropową (opisującą zmiany objętości w źródle) oraz dewiatorową, na którą składa się podwójna para sił (DBCP) i skompensowany liniowy dipol wektorowy (CLVD). Można go zapisać w następującej postaci (Ben-Menahem, Singh 1981):

$$\begin{aligned}
 \mathbf{M} = M_{ij}e_i e_j = & \frac{1}{3}(M_{11} + M_{22} + M_{33})(e_1 e_1 + e_2 e_2 + e_3 e_3) + \\
 & + \frac{1}{3}(2M_{11} - M_{22} - M_{33})e_1 e_1 + \\
 & + \frac{1}{3}(2M_{22} - M_{33} - M_{11})e_2 e_2 + \\
 & + \frac{1}{3}(2M_{33} - M_{11} - M_{22})e_3 e_3 + \\
 & + \frac{1}{2}(M_{32} + M_{23})(e_3 e_2 + e_2 e_3) + \\
 & + \frac{1}{2}(M_{13} + M_{31})(e_1 e_3 + e_3 e_1) + \\
 & + \frac{1}{2}(M_{21} + M_{12})(e_2 e_1 + e_1 e_2) + \\
 & + \frac{1}{2}(M_{32} - M_{23})(e_3 e_2 - e_2 e_3) + \\
 & + \frac{1}{2}(M_{13} - M_{31})(e_1 e_3 - e_3 e_1) + \\
 & + \frac{1}{2}(M_{21} - M_{12})(e_2 e_1 - e_1 e_2)
 \end{aligned} \tag{5}$$

gdzie e_i, e_j – wersory wzdłuż osi x_i i x_j .

Pierwszy wyraz po prawej stronie równania (5) opisuje procesy kompresji w źródle, kolejne wyrazy opisują odpowiednio trzy dipole wzdłuż osi układu współrzędnych, trzy podwójne pary sił oraz trzy skręcenia dookoła osi układu współrzędnych. Ponieważ tensor momentu sejsmicznego jest symetryczny (zgodnie z zasadą zachowania momentu obrotowego równoważnych sił w źródle), czyli $M_{ij} = M_{ji}$, skręcenia dookoła osi układu współrzędnych znikają. Dekompozycja tensora momentu sejsmicznego na część izotropową, na liniowy skompensowany dipol i na podwójną parę sił jest najczęściej przyjmowanym opisem źródła sejsmicznego (Stec 2009).

Część izotropowa opisuje zmiany objętości. Skompensowany liniowy dipol wektorowy (CLVD) może opisywać pęknięcie filarów, zbliżone mechanizmem do jednoosiowego ściskania (Marcak, Zuberek 1994). Podwójna para sił (DBC) opisuje ścinania i poślizgi. Uwzględniając wszystkie wymienione składowe tensora momentu sejsmicznego uzyskuje się pełny opis mechanizmu źródła wstrząsu, w którym wyznacza się udział poszczególnych mechanizmów.

Do określenia mechanizmu źródła wstrząsu górotworu posłużono się programem FOCI (Kwiatek 2009). Program ten umożliwia uzyskanie trzech modeli ogniska wstrząsu, opisanych przez trzy rodzaje tensora momentu sejsmicznego:

- ogólny,
- dewiatoryczny,
- czystego ścinania.

Tensor ogólny zawiera składową izotropową I, która opisuje zmiany objętości w ognisku (eksplozja $/+ /$ lub implozja $/- /$), składową CLVD odpowiadającą jednoosiowemu ściskaniu $/- /$ lub rozciąganiu $/+ /$ oraz składową ścinającą DBCP opisywaną przez podwójną parę sił. Tensor dewiatoryczny (związany ze zmianą postaci bez zmiany objętości) zawiera dwie składowe, tj. CLVD i DBCP, natomiast tensor czystego ścinania ma tylko składową DBCP.

Eksplozyjny lub implozyjny model ogniska odpowiada procesom objętościowego niszczenia struktury ośrodka (Stec, Błaszczuk 2008). Sytuacja taka dotyczy wstrząsów spowodowanych strzelaniami (wstrząsowymi – w pokładzie węgla lub torpedującymi – w stropie lub spągu) w ramach aktywnej profilaktyki tąpniowej lub występujących w wyniku nacisku na pokład nadległych warstw skalnych. Liniowy skompensowany dipol wektorowy odpowiada w przybliżeniu jednoosiowemu ściskaniu lub rozciąganiu i może dotyczyć wspomnianego wcześniej pęknięcia filarów. Mechanizm opisany podwójną parą sił odpowiada wstrząsom związanym z pękaniem grubych, zwięzłych kompleksów skalnych o dużej sztywności i wytrzymałości, występujących w stropie pokładu (np. grubej warstwy piaskowca) oraz przemieszczaniem się mas skalnych na płaszczyznach uskoków.

5. WYNIKI OBLICZEŃ MECHANIZMU OGNISK WSTRZĄSÓW Z REJONU ŚCIANY 502




















Parametry mechanizmu ognisk wstrząsów, które występowały podczas eksploatacji w pokładzie 510 ściany 502 zostały określone na podstawie sejsmogramów zarejestrowanych przez kopalnianą sieć sejsmologiczną kopalni „Bielszowice”. Układ stanowisk sejsmometrycznych w rejonie ściany 502 był szczególnie korzystny, ze względu na ich równomierne i optymalne rozmieszczenie zarówno względem siebie, jak i względem obserwowanego rejonu. Takie rozmieszczenie stanowisk sejsmometrycznych jest szczególnie istotne przy określaniu mechanizmu ognisk wstrząsów.

Obliczenia tensora momentu sejsmicznego zostały wykonane w programie FOCI w oparciu o inwersję amplitud pierwszych wstąpień fali P, z uwzględnieniem kierunków pierwszych wychyleń w domenie czasu. Obliczono mechanizm ognisk wszystkich wstrząsów o energii $E \geq 1,0 E + 05 J$ oraz kilkunastu o energii poniżej $1,0 E + 05 J$. Przy obliczaniu mechanizmu ognisk bardzo istotna jest dokładna lokalizacja hipocentrum wstrząsu. Przyjęto poprawne określenie poziomych współrzędnych ognisk wstrząsów, a do udokładnienia współrzędnej pionowej wykorzystano współczynniki jakości rozwiązań i błędy wyznaczania składowych tensora momentu sejsmicznego. W przypadku zdecydowanej większości analizowanych wstrząsów najlepsze dopasowanie rozwiązania uzyskano dla głębokości od około -500 do -550 m n.p.m. Głębokość ta odpowiadała położeniu warstwy piaskowca określanego jako „wstrząsogeny”. Drugą uzyskaną głębokością była głębokość od około -600 do 620 m n.p.m. Jest to głębokość pokładu węglowego lub warstw zalegających bezpośrednio nad pokładem 510.

Tabela 1. Zestawienie parametrów sejsmologicznych i parametrów mechanizmu ognisk wstrząsów o poślizgowym mechanizmie ognisk występujących podczas eksploatacji ściany 502 w pokładzie 510

Data	Czas		Energia J	Współrzędne m			Uwagi ²⁾	Składowe tensora %			Typ mechanizmu ³⁾	
	h	min		X	Y	Z ¹⁾		ISO	CLVD	DBCP		
2009-03-25	3	50	2,0E+05	15040	4060	-597	10 ZF	-9	10	81	RE	
2009-03-27	4	35	3,0E+05	14980	4070	-530	10 ZF	-19	-19	62	NO	
2009-03-31	3	24	3,0E+06	15170	4120	-550	100 ZF	-18	-19	63	NO	
2009-04-06	14	49	3,0E+05	14980	4070	-586	20 ZF	-19	-19	62	NO	
2009-04-07	16	2	4,0E+05	14980	4080	-570	40 ZF	-19	-20	61	NO	
2009-04-10	17	59	8,0E+05	14970	4050	-476	20 ZF	-19	-20	61	NO	

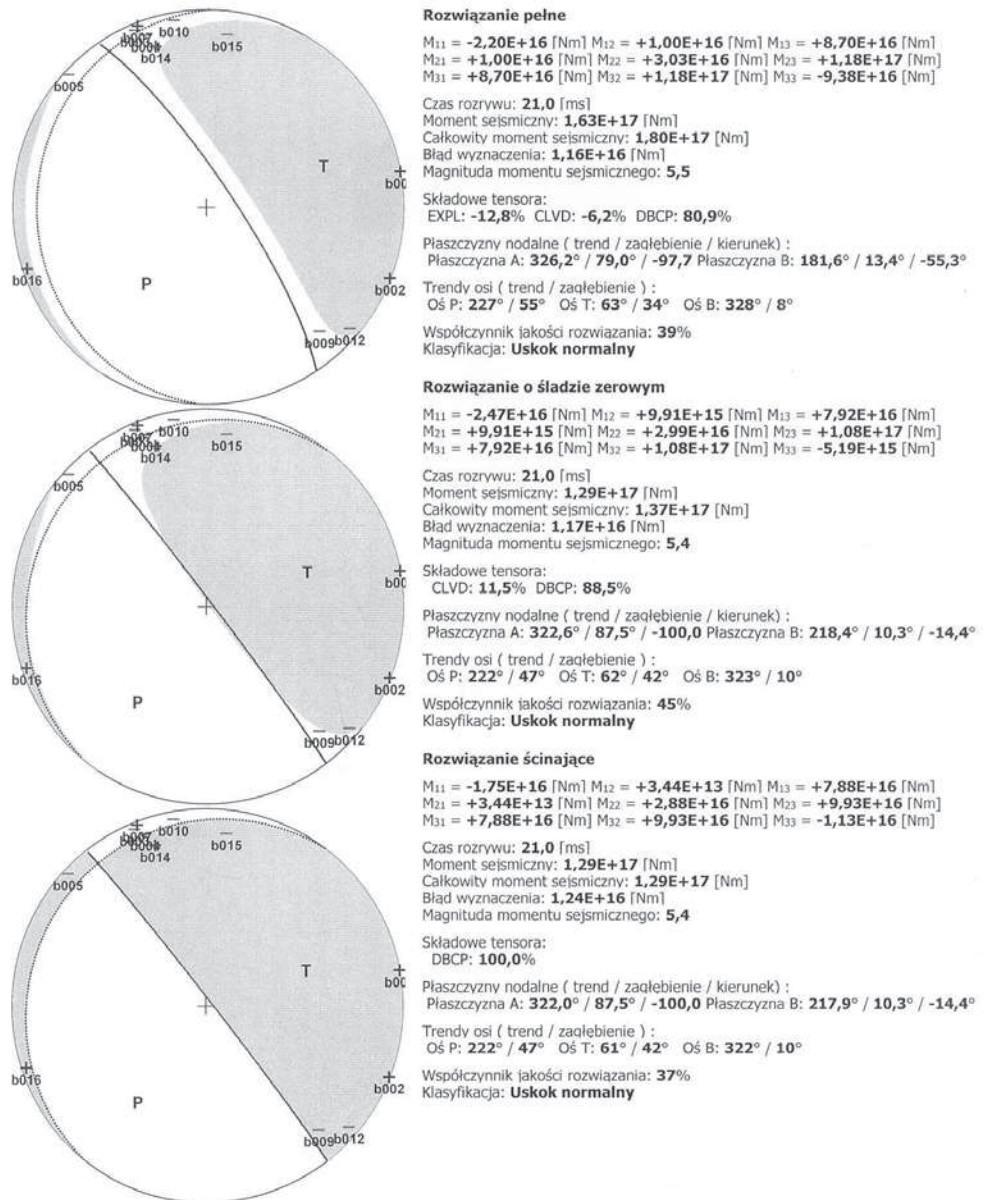
Mining and Environment

2009-04-21	21	10	4,0E+05	14980	4090	-550	90 ZF	-19	-20	61	NO	
2009-04-25	4	53	6,0E+05	14970	4020	-560	20 ZF	-19	-20	61	NO	
2009-05-05	5	13	4,0E+05	14940	4020	-550	40 ZF	-19	-19	62	NO	
2009-05-15	9	27	4,0E+05	14920	4010	-600	30 ZF	-19	-16	65	NO	
2009-05-26	13	44	8,0E+05	14940	3890	-550	50 PF	15	19	66	RE	
2009-06-23	0	49	8,0E+05	14980	3870	-540	20 PF	-12	-18	70	RE	
2009-06-24	21	16	3,0E+05	14960	3950	-550	50 ZF	-14	-19	67	NO	
2009-06-30	10	56	4,0E+05	15160	3910	-550	70 ZF	-19	-17	64	NO	
2009-07-01	11	23	3,0E+06	14990	3890	-493	20 ZF	-13	-6	81	NO	
2009-07-09	2	39	8,0E+05	14950	3840	-550	40 PF	25	25	50	RE	
2009-07-14	15	49	9,0E+05	14950	3840	-550	30 PF	20	17	63	RE	
2009-07-21	11	45	4,0E+05	14950	3830	-550	40 PF	3	4	92	RE	
2009-07-23	14	36	3,0E+05	14970	3900	-550	60 ZF	-16	-17	67	NO	
2009-07-28	0	4	4,0E+05	14930	3880	-580	40 ZF	-10	-10	79	NO	
2009-08-01	2	35	3,0E+05	14880	3850	-550	10 ZF	-18	-19	63	NO	
2009-08-11	18	33	3,0E+05	14950	3870	-550	40 ZF	-14	-17	69	NO	
2009-08-13	12	28	3,0E+05	14880	3830	-560	30 ZF	-14	-14	72	NO	
2009-08-14	21	28	4,0E+05	14940	3800	-580	PF 20	10	9	81	RE	
2009-09-01	14	39	2,0E+05	14930	3790	-550	PF 0	8	13	78	RE	

2009-09-29	19	5	4,0E+05	14980	3780	-550	ZF 50	-16	-19	66	NO	
2009-10-06	4	35	2,0E+05	15070	3770	-560	ZF 70	-13	-18	69	NO	
2009-10-07	10	36	4,0E+05	14950	3760	-550	ZF 40	-11	-10	69	NO	
2009-10-09	9	36	5,0E+05	14940	3740	-564	ZF 40	-15	-16	69	NO	
2009-10-28	12	57	6,0E+05	14920	3720	-450	ZF 20	26	24	50	RE	

¹⁾ Głębokość ognisk [m] określona z dopasowania rozwiązania według programu FOCI, ²⁾ odległość ogniska [m] występującego: PF – przed frontem, ZF – za frontem, ³⁾ NO – typ mechanizmu ogniska poślizgowy normalny, RE – typ mechanizmu ogniska poślizgowy odwrócony.

Dominującym typem mechanizmu ognisk wstrząsów o energii $E \geq 1,0 \text{ E} + 05 \text{ J}$ był mechanizm poślizgowy zarówno normalny, jak i odwrócony (tab. 1). Przykład wyników obliczeń dla ścinającego mechanizmu ogniska przedstawiono na rysunku 4. Ogniska tych zjawisk zawierały średnio do 20% implozji, do 20% składowej jednoosiowego rozciągania oraz od 50 do 80% składowej ścinającej. Stwierdzono, że wstrząsy lokalizowane za frontem eksploatacyjnym charakteryzowały się typem poślizgowym normalnym, a wstrząsy, które wystąpiły przed frontem były typu poślizgowego odwróconego. Dla zdecydowanej większości zjawisk azymut rozciągłości jednej z płaszczyzn nodalnych można było skorelować w granicach błędu obliczeń (10°) z położeniem frontu. Położenie ognisk analizowanych wstrząsów, które wystąpiły za frontem wraz z ich mechanizmem przedstawiono na rysunku 5. Biorąc po uwagę typ mechanizmu ognisk i ich głębokość (od -500 do -550 m n.p.m.) oraz kierunek pęknięcia w ognisku, który był równoległy do frontu ściany, można wykazać, że aktywność sejsmiczna odzwierciedlała typowe procesy destrukcyjne zachodzące w wyniku pęknięcia czy też załamywania się wstrząsogennej warstwy piaskowcowej, powodowane postępowaniem ściany. Ze względu na znaczną odległość od frontu ściany wstrząsy wysokoenergetyczne nie stanowiły bezpośredniego zagrożenia dla prowadzonej eksploatacji.



Rys. 4. Mechanizm ogniska wstrząsu – kopalnia „Bielszowice”, 1.07.2009, godz. 11:23, energia $3,0E + 06$ J

Fig. 4. The tremor source mechanism – "Bielszowice" mine, 1/07/2009, at. 11:23, the energy $3.0E + 06$ J



Rys. 5. Położenie ognisk wstrząsów, typu poślizgowego, które wystąpiły za frontem wraz z ich mechanizmami

Fig. 5. The location of tremor sources of the slip type that occurred behind the front with their mechanisms

Mechanizm ognisk dla trzech wstrząsów o energii $E \geq 1,0 E + 05 J$ był eksplozywny, a w przypadku kilkunastu przykładowo analizowanych zjawisk o niższej energii, był zarówno eksplozywny, jak i poślizgowy. Ogniska wstrząsów o mechanizmie eksplozywnym w przypadku rozwiązania pełnego tensora momentu sejsmicznego zawierały średnio 40% eksplozji, 40% składowej jednoosiowego ściskania oraz bardzo mały udział składowej ścinającej (około 20%). Ze względu na bardzo duży udział składowej eksplozywnej nie określono dominującej płaszczyzny pęknięcia w ognisku. Ten typ ognisk oraz głębokość ich występowania świadczyły o tym, że w ognisku zachodziły typowe procesy związane z destrukcją pokładu 510 lub warstw położonych w stropie bezpośrednim. Parametry sejsmologiczne wstrząsów oraz wyniki analizy mechanizmu ognisk dla drugiej grupy wstrząsów przedstawiono w tabeli 2.

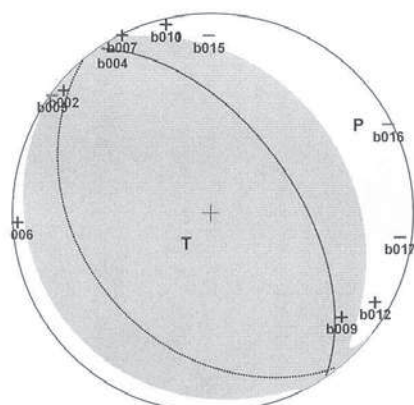
Tabela 2. Zestawienie parametrów sejsmologicznych i parametrów mechanizmu ognisk wstrząsów o eksplozywnym typie ognisk oraz niskoenergetycznych podczas eksploatacji ściany 502 w pokładzie 510

Data	Czas		Energia J	Współrzędne m			Uwagi ²⁾	Składowe tensora %			Typ mechanizmu ³⁾	
	h	m		X	Y	Z ¹⁾		ISO	CLVD	DBCP		
2009-07-15	18	7	2,0E+05	15030	3870	-600		43	36	21	EXP	
2009-07-21	22	7	3,0E+05	14940	840	-600	20 PF	46	48	6	EXP	

2009-08-04	20	15	4,0E+05	14990	3780	-600	40 PF	28	29	43	EXP	
Wstrząsy o energii $E < 1,0E + 05$ J												
2009-03-12	13	22	6,0E+04	15210	4030	-610	10 ZF	-20	-19	61	NO	
2009-03-14	15	50	8,0E+03	15200	3980	-600		47	49	5	EXP	
2009-03-15	14	38	9,0E+04	15160	4040	-550		46	47	7	EXP	
2009-03-18	0	1	7,0E+04	15050	4050	-550		41	41	18	EXP	
2009-03-19	18	15	7,0E+04	15030	4030	-550		45	42	13	EXP	
2009-03-21	10	40	9,0E+03	14940	4050	-610		-16	-17	67	NO	
2009-03-24	8	57	8,0E+04	15050	3980	-600	70 PF	-17	-12	71	NO	
2009-03-26	21	59	8,0E+03	14960	4000	-580		-18	-18	64	NO	
2009-04-02	3	14	9,0E+03	14980	4100	-610		43	37	19	EXP	
2009-04-16	8	8	6,0E+03	15220	3710	-600		-19	-19	62	NO	
2009-04-21	18	36	6,0E+03	15240	4070	-600		-19	-18	65	NO	
2009-04-23	17	26	7,0E+03	14970	4030	-600		46	47	7	EXP	
2009-05-01	3	34	8,0E+03	15010	4000	-600		-18	-18	63	NO	
2009-07-20	3	44	5,0E+04	14940	3600	-617	240 PF	40	50	10	EXP	

¹⁾ Głębokość ognisk [m] określona z dopasowania rozwiązania według programu FOCI, ²⁾ odległość ogniska [m] występującego: PF – przed frontem, ZF – za frontem, ³⁾ NO – typ mechanizmu ogniska poślizgowy normalny, EXP – eksplozywny typ mechanizmu ogniska.

Przykład określenia mechanizmu ognisk dla wstrząsów typu eksplozywnego przedstawiono na rysunku 6, na rysunku 7 natomiast przedstawiono położenie ognisk wstrząsów typu poślizgowego i eksplozywnego, które wystąpiły przed frontem ściany 502 wraz z ich mechanizmem.



Rozwiązanie pełne

$M_{11} = -3,23E+14$ [Nm] $M_{12} = -4,36E+14$ [Nm] $M_{13} = -7,33E+14$ [Nm]
 $M_{21} = -4,36E+14$ [Nm] $M_{22} = -4,58E+14$ [Nm] $M_{23} = -1,56E+15$ [Nm]
 $M_{31} = -7,33E+14$ [Nm] $M_{32} = -1,56E+15$ [Nm] $M_{33} = +8,08E+15$ [Nm]

Czas rozrywu: **21,0** [ms]
 Moment sejsmiczny: **6,00E+15** [Nm]
 Całkowity moment sejsmiczny: **8,37E+15** [Nm]
 Błąd wyznaczenia: **2,66E+14** [Nm]
 Magnituda momentu sejsmicznego: **4,5**

Składowe tensora:

EXPL: **40,5%** CLVD: **40,0%** DBCP: **19,5%**

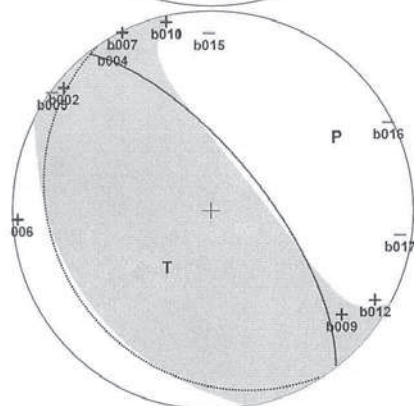
Plaszczyzny nodalne (trend / zaogłębienie / kierunek) :
 Plaszczyzna A: **325,5° / 55,4° / 92,8** Plaszczyzna B: **140,5° / 34,7° / 85,9°**

Trendy osi (trend / zaogłębienie) :

Oś P: **53° / 10°** Oś T: **246° / 79°** Oś B: **144° / 2°**

Współczynnik jakości rozwiązania: **40%**

Klasyfikacja: **Uskok odwrócony**



Rozwiązanie o śladzie zerowym

$M_{11} = -1,63E+14$ [Nm] $M_{12} = -4,95E+14$ [Nm] $M_{13} = -4,81E+14$ [Nm]
 $M_{21} = -4,95E+14$ [Nm] $M_{22} = -4,63E+14$ [Nm] $M_{23} = -6,08E+14$ [Nm]
 $M_{31} = -4,81E+14$ [Nm] $M_{32} = -6,08E+14$ [Nm] $M_{33} = +6,26E+14$ [Nm]

Czas rozrywu: **21,0** [ms]
 Moment sejsmiczny: **9,61E+14** [Nm]
 Całkowity moment sejsmiczny: **1,08E+15** [Nm]
 Błąd wyznaczenia: **2,44E+14** [Nm]
 Magnituda momentu sejsmicznego: **4,0**

Składowe tensora:

CLVD: **-13,0%** DBCP: **87,0%**

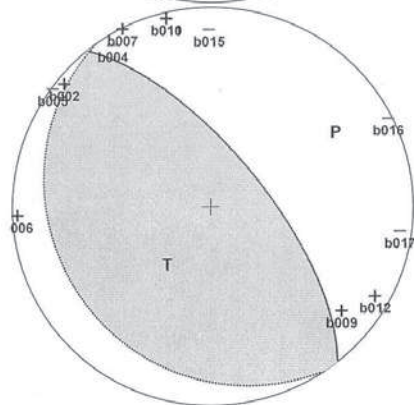
Plaszczyzny nodalne (trend / zaogłębienie / kierunek) :
 Plaszczyzna A: **321,8° / 68,4° / 88,5** Plaszczyzna B: **145,9° / 21,6° / 93,8°**

Trendy osi (trend / zaogłębienie) :

Oś P: **53° / 23°** Oś T: **229° / 67°** Oś B: **322° / 1°**

Współczynnik jakości rozwiązania: **37%**

Klasyfikacja: **Uskok odwrócony**



Rozwiązanie ścinające

$M_{11} = -2,35E+14$ [Nm] $M_{12} = -3,16E+14$ [Nm] $M_{13} = -4,46E+14$ [Nm]
 $M_{21} = -3,16E+14$ [Nm] $M_{22} = -4,23E+14$ [Nm] $M_{23} = -5,41E+14$ [Nm]
 $M_{31} = -4,46E+14$ [Nm] $M_{32} = -5,41E+14$ [Nm] $M_{33} = +6,58E+14$ [Nm]

Czas rozrywu: **21,0** [ms]
 Moment sejsmiczny: **9,61E+14** [Nm]
 Całkowity moment sejsmiczny: **9,61E+14** [Nm]
 Błąd wyznaczenia: **2,66E+14** [Nm]
 Magnituda momentu sejsmicznego: **4,0**

Składowe tensora:

DBCP: **100,0%**

Plaszczyzny nodalne (trend / zaogłębienie / kierunek) :
 Plaszczyzna A: **321,3° / 68,4° / 88,5** Plaszczyzna B: **145,4° / 21,6° / 93,8°**

Trendy osi (trend / zaogłębienie) :

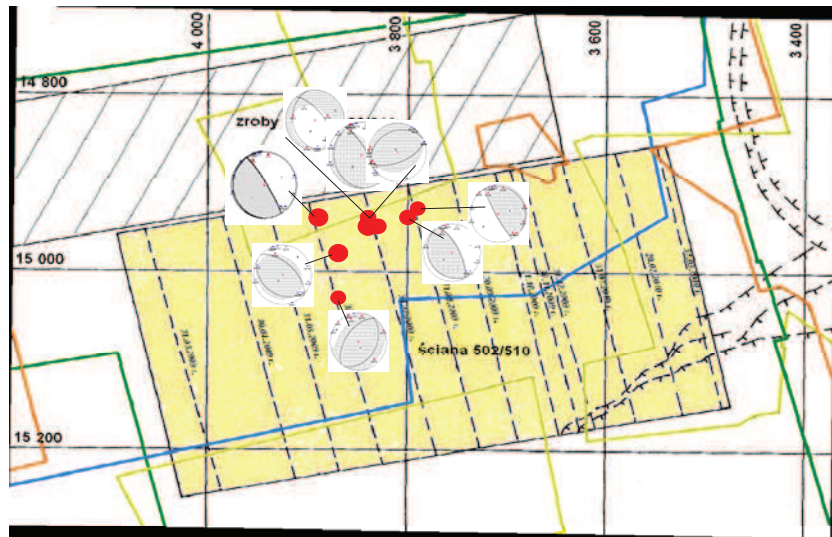
Oś P: **52° / 23°** Oś T: **229° / 67°** Oś B: **322° / 1°**

Współczynnik jakości rozwiązania: **30%**

Klasyfikacja: **Uskok odwrócony**

Rys. 6. Mechanizm ogniska wstrząsu – kopalnia „Bielszowice”, 15.03.2009, godz. 14:38, energia $9,0E + 04$ J

Fig. 6. The tremor source mechanism – "Bielszowice" mine, 15/07/2009, at. 14:38, energy $9.0E + 04$ J



Rys. 7. Położenie ognisk wstrząsów typu poślizgowego oraz eksplozyjnego, które wystąpiły przed frontem ściany 502 wraz z ich mechanizmami

Fig. 7. The location of tremor sources of the slip and explosive type that occurred before the front of the longwall 502 with their mechanisms

Na podstawie wyników badań mechanizmu ognisk wstrząsów występujących podczas eksploatacji ściany 502 w pokładzie 510 w kopalni „Bielszowice”, stwierdzono wystąpienie dwóch grup wstrząsów. Prawie wszystkie analizowane wstrząsy o energii $E \geq 1,0 E + 05 J$ charakteryzowały się mechanizmami poślizgowymi o azy-mutach płaszczyzn pęknięcia zbliżonych do rozciągłości frontu eksploatacyjnego. Można przypuszczać, że tego typu wstrząsy występowały w wyniku zmian naprężeniowych zachodzących w położonej nad pokładem 510 warstwie piaskowca, która pękała wraz z postępowaniem ściany.

Słabsze zjawiska o energii $E < 1,0 E + 05 J$ charakteryzowały się mechanizmem zarówno poślizgowym, jak i mechanizmem z dużym udziałem składowej eksplozyjnej. Głębokość występowania ognisk może wskazywać na procesy związane z destrukcją pokładu 510 lub warstw położonych w stropie bezpośrednim.

6. PODSUMOWANIE

Badania mechanizmu ognisk wstrząsów wskazały na możliwość uzyskiwania dodatkowych informacji o procesach destrukcji górotworu zachodzących w wyniku prowadzonej eksploatacji górniczej. Ze względu na możliwość udokładnienia informacji w zakresie pionowej lokalizacji ognisk wstrząsów z dużym prawdopodobieństwem można określić obszary tzw. wstrząsogenne.

W przypadku ognisk silnych wstrząsów, które wystąpiły w rejonie prowadzonej w kopalni „Bielszowice” ściany 502 w pokładzie 510, najlepsze dopasowanie rozwiązania mechanizmu ogniska uzyskano dla składowej pionowej zawierającej się w prze-

dziale od około –500 do około –550 m n.p.m., co odpowiadało głębokości zalegania wstrząsogennej warstwy piaskowca o miąższości 18 m.

Obserwacja zmienności mechanizmu ognisk wstrząsów skorelowana z warunkami geologiczno-górnictwymi w rejonie eksploatacji może stanowić dodatkową informację o zakresie zmian stanu naprężeniowo-deformacyjnego w obrębie warstw wstrząsogennych, co w efekcie może przyczynić się poprawy oceny stanu zagrożenia tąpnięciami.

Literatura

1. Aki K., Richards P.G. (1980): *Quantitative Seismology – Theory and Methods*, vol. 1, 2. San Francisco, W. H. Freeman & Co.
2. Backus G., Mulcahy M. (1976): *Moment Tensor and Other Phenomenological Description of Seismic Sources*. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, s. 341–361.
3. Ben-Menahem A., Singh S.J. (1981): *Seismic Waves and Sources*. New York, Springer-Verlag.
4. Gibowicz S.J. (1995): *Mechanizm ognisk wstrząsów*. [W:] *Wstrząsy górnicze – mechanizm, lokalizacja i energia*. Szkoła Eksploatacji Podziemnej. Kraków, CPPGSMiE PAN, s. 5–30.
5. Kwiatek G. (2009): *Foci – tensor momentu sejsmicznego – parametry spektralne*. Opis programu (publikacja internetowa: www.sejsmologia-gornicza.pl/foci/download.php).
6. Marczak H., Zuberka W.M. (1994): *Geofizyka górnicza*. Katowice, Śląskie Wydaw. Techniczne, s. 143–149.
7. Stec K. (2005): *Charakterystyka mechanizmu ognisk wstrząsów górniczych z obszaru Górnośląskiego Zagłębia Węglowego*. *Wiadomości Górnicze* nr 4, s. 168–174.
8. Stec K. (2009): *Mechanizm ogniska wstrząsu i metody jego wyznaczania*. *Warsztaty z cyklu „Zagrożenia naturalne w górnictwie”*. Kraków, IGSMiE PAN, s. 287–305.
9. Stec K., Błaszczuk E. (2008): *Charakterystyka procesów zachodzących w ogniskach wysokoenergetycznych wstrząsów występujących w czasie eksploatacji ściany 17 w pokładzie 361 w KWK „Knurów”*. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* t. 24, z. 2/3, s. 226–244.
10. Więjacz P. (2001): *Badania mechanizmów wstrząsów górniczych w Polsce*. [W:] *Badania geofizyczne w kopalniach*. Praca zbiorowa pod red. J. Dubińskiego, Z. Pileckiego, W.M. Zuberka. Kraków, IGSMiE PAN, s. 25–33.

Recenzent: dr hab. inż. Grzegorz Mutke, prof. GIG