

Wieloprzyczynowość wysokoenergetycznych wstrząsów górniczych

Multisources of high-energy mine tremors occurring during longwall mining of coal seam in varied geological and mining conditions



Mgr Malgorzata Knopik^{*)}



Prof. dr hab. inż. Wacław M. Zuberek^{*)}



Dr Łukasz Wojtecki^{**)}

Treść: Analiza mechanizmu ogniska wstrząsu pozwala odtworzyć sposób destrukcji górotworu w strefie ogniskowej. Najbardziej prawdopodobne mechanizmy powstawania zjawisk sejsmicznych można określić dzięki metodzie inwersji tensora momentu sejsmicznego. Poznanie procesów zachodzących w ogniskach wysokoenergetycznych wstrząsów towarzyszących eksploatacji górniczej umożliwia poprawniejszą ocenę zagrożenia tąpnięciami metodą sejsmologiczną. W artykule zostały przedstawione wyniki analizy mechanizmów ognisk wysokoenergetycznych wstrząsów (o energii sejsmicznej $\geq 10^5$ J), powstałych podczas eksploatacji ścianowej pokładu 510 prowadzonej w jednej z kopalń GZW. Obliczone mechanizmy ognisk wstrząsów były skorelowane z występującymi w rejonie objętej badaniami ściany warunkami górniczo-geologicznymi. W mechanizmie ognisk analizowanych wstrząsów dominowała składowa ścinająca. Czynniki odpowiedzialnymi za powstawanie najsilniejszych wstrząsów były przemieszczenia na uskokach, pęknięcie grubej warstwy piaskowca zalegającej nad eksploatowanym pokładem oraz zmiana równowagi naprężeniowej w filarze dla przekopów skrzydłowych spowodowana prowadzoną eksploatacją. W ogniskach kilku wstrząsów za frontem ściany stwierdzono także występowanie mechanizmu implozyjnego, wskazującego na destrukcję skał stropowych w wyniku tworzenia się zawału.

Abstract: An analysis of the tremor source mechanism allows to reconstruct the way of rock mass destruction in the focus zone. The most probable ways of seismic events generation may be determined using the seismic moment tensor inversion method. Understanding the processes which take place in the high-energy tremors foci enables a proper assessment of the rockburst hazard with the use of seismological method. In this paper the results of the analysis of the focal mechanism of high-energy tremors (about seismic energy $\geq 10^5$ J) generated during longwall mining of the coal seam 510 in one of the hard coal mines in the Upper Silesian Coal Basin are presented. The determined tremors source mechanisms were correlated with geological and mining conditions occurring in the area of the investigated longwall. In the source mechanism of the analyzed mine tremors the shear component predominated. Dislocations on faults, cracking of thick layer of sandstone above the exploited coal seam and change of stress equilibrium in pillar for flank drifts caused by the investigated longwall were factors responsible for high-energy tremors occurrence. In the sources of some tremors behind the longwall mechanism of implosion also occurred, which may indicate the destruction of roof rocks because of caving formation.

Słowa kluczowe:

wstrząsy górnicze, mechanizm ognisk, tensor momentu sejsmicznego

Key words:

mine tremors, focal mechanism, seismic moment tensor

1. Wprowadzenie

Eksploatacji pokładów węgla kamiennego często towarzyszą wstrząsy górotworu, w tym także wstrząsy wysokoenergetyczne. W warunkach GZW występują wstrząsy związane

bezpośrednio z prowadzoną eksploatacją, których energia sejsmiczna i liczba jest właściwa dla określonych warunków geologiczno-górnicyznych. W warunkach szczególnych (resztki, krawędzie, uskoki) występują wstrząsy incydentalne, których energia sejsmiczna przeważnie jest większa od wspomnianych wcześniej. Wstrząsy te są również związane z prowadzoną eksploatacją. Sporadycznie występują wstrząsy regionalne (o energii sejsmicznej rzędu 10^8 - 10^9 J), które są

^{*)} Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk o Ziemi, ^{**)} Kompania Węglowa S.A., Katowice

rezultatem całokształtu przeprowadzonych robót w danym rejonie, a których przyczyn nie udaje się jednoznacznie powiązać z robotami aktualnie prowadzonymi lub których udział w spowodowaniu takich wstrząsów nie pozostaje w żadnej proporcji do wartości wyzwolonej energii sejsmicznej [13].

Poznanie procesów odpowiedzialnych za występowanie wstrząsów górotworu, a w szczególności wstrząsów wysokoenergetycznych podczas prowadzonej eksploatacji górniczej umożliwia poprawniejszą ocenę stanu zagrożenia tapaniami metodą sejsmologiczną. Wyznaczenie mechanizmów odpowiedzialnych za powstawanie wstrząsów górotworu jest możliwe dzięki metodzie inwersji tensora momentu sejsmicznego. Metoda inwersji tensora momentu sejsmicznego była stosowana początkowo w sejsmologii ogólnej. Znalazła ona jednak szerokie zastosowanie do analizy wstrząsów górniczych [6, 10, 5, 17, 15, 11, 12, 14, 9, 16]. Metodę inwersji tensora momentu sejsmicznego zastosowano dla wysokoenergetycznych wstrząsów (o energii sejsmicznej $\geq 10^5$ J) indukowanych podczas eksploatacji ścianowej pokładu 510 w jednej z kopalń GZW, dzięki czemu określono najbardziej prawdopodobny mechanizm powstawania tych wstrząsów. Uzyskane wyniki powiązano z lokalnymi warunkami górniczymi.

2. Warunki górniczo-geologiczne w rejonie badanej ściany

Objęta badaniami ściana prowadzona była na zawał w warstwie przystropowej pokładu 510 w kierunku z zachodu na wschód. Rozciągłość warstw w rejonie projektowanej ściany posiada kierunek od WSW-ENE do WNW-ESE przy upadzie rzędu 8° - 19° . Miąższość pokładu 510 w tym rejonie waha się od 5,3 m do 8,1 m. Największe miąższości pokładu 510 (do 8,10 m) występowały we wschodniej oraz północnej części wybiegu ściany, a najmniejsze miąższości pokładu (w granicach 5,3-6,5 m, związane ze strefami zaburzeń tektonicznych) występowały w środkowej oraz południowo-zachodniej części wybiegu ściany. Głębokość zalegania pokładu 510 w tym rejonie osiągała maksymalnie 910 m.

W spągu pokładu 510 występuje łupek ilasty, łupek piaszczysty oraz piaskowiec drobnoziarnisty. W stropie pokładu 510 występują: łupek piaszczysty, piaskowiec drobnoziarnisty, łupek piaszczysty oraz łupek ilasty o sumarycznej miąższości nieprzekraczającej 13 m, powyżej których zalega pokład 507. W odległości od około 70 m nad pokładem 510 występują grube warstwy piaskowca o dużej wytrzymałości, które łącznie z występującymi między nimi warstwami łupków piaszczystych i ilastych mają miąższość dochodzącą do 60 m.

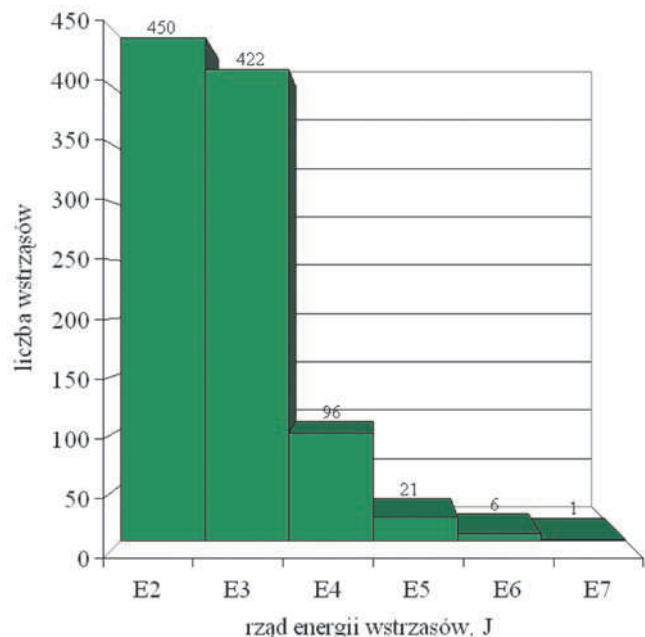
W początkowej i środkowej części wybiegu analizowanej ściany występowały strefy zaburzeń tektonicznych w postaci serii uskoków o przebiegu od SW-NE do WNW-ESE. Zrzut uskoków waha się od $0,2$ m do $5,5$ m, a nachylenie płaszczyzn uskokowych zawiera się w przedziale od około 20° do około 85° .

Ściana rozpoczynała swój bieg w rejonie filara dla przekopów skrzydłowych, w sąsiedztwie uskoku o zrzucie 25 m i przebiegu NW-SE, a następnie była prowadzona wzdłuż zrobów wytworzonych w górnym piętrze ścianowym. Pole objętej badaniami ściany w całości znajdowało się pod wcześniej wybranym pokładem 507. Wcześniej dokonano tutaj również eksploatacji pokładu 502, zalegającego w odległości około 126 m nad pokładem 510. Na wybiegu analizowanej ściany występowała jednak resztko o nieregularnym kształcie wytworzona w pokładzie 501, zalegającym w odległości około 140 m nad pokładem 510. Eksploatacja pokładu 510 przedmiotową ścianą trwała w sumie około 16 miesięcy. W artykule przeanalizowano mechanizmy ognisk wysokoenergetycznych wstrząsów powstałych w okresie pierwszych

6 miesięcy eksploatacji, prowadzonej w zmiennych warunkach górniczo-geologicznych.

3. Aktywność sejsmiczna w rejonie objętej badaniami ściany

W przyjętym oknie czasowym, tj. przez pierwsze 6 miesięcy biegu ściany, w rejonie objętej badaniami ściany wystąpiło w sumie 996 wstrząsów o sumarycznej energii $6 \cdot 10^7$ J, w tym 996 wstrząsów o energii rzędu 10^2 J, 422 wstrząsów o energii rzędu 10^3 J, 96 wstrząsów o energii rzędu 10^4 J, 21 wstrząsów o energii rzędu 10^5 J, 6 wstrząsów o energii rzędu 10^6 J i 1 wstrząs o energii rzędu 10^7 J (rys. 1). Przeważająca większość wysokoenergetycznych wstrząsów koncentrowała się za frontem ściany. W analizowanym okresie ściana uzyskała około 225 m postępu.

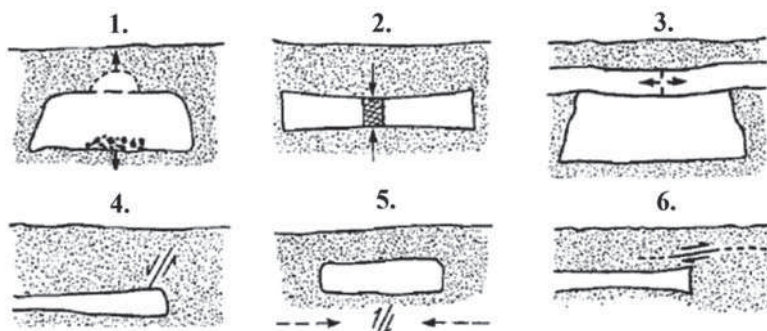


Rys. 1. Rozkład aktywności sejsmicznej w rejonie objętej badaniami ściany (w przyjętym oknie czasowym)

Fig. 1. Seismic activity distribution in the region of the investigated longwall (in the determined time window)

4. Podstawy wyznaczania mechanizmu ognisk wstrząsów

Ważnym osiągnięciem w sejsmologii górniczej jest możliwość tworzenia sejsmologicznych modeli i mechanizmów ognisk wstrząsów górotworu spowodowanych eksploatacją górniczą [11]. Jako podstawowy mechanizm w punktowym źródle wstrząsu (ognisko) przyjmują się układ odpowiednio ukierunkowanych dipoli sił. Zakłada się, że wstrząsy powstają w wyniku działania określonych systemów sił na pewien fragment górotworu, który stanowi ognisko wstrząsu. Odpowiednio zorientowane w przestrzeni systemy sił determinują ściśle określone dla nich przebiegi procesów dynamicznych [15], które są źródłem promieniowania sejsmicznego o ściśle określonej charakterystyce. Sejsmogramy zawierają informację o układzie sił działających w ognisku wstrząsu, a także o przebiegu zachodzącego w nim procesu dynamicznego [12]. W ogniskach wstrząsów indukowanych eksploatacją górniczą, oprócz najczęstszych procesów ścinania, mogą występować także inne mechanizmy [10], co zostało przedstawione na rysunku 2.

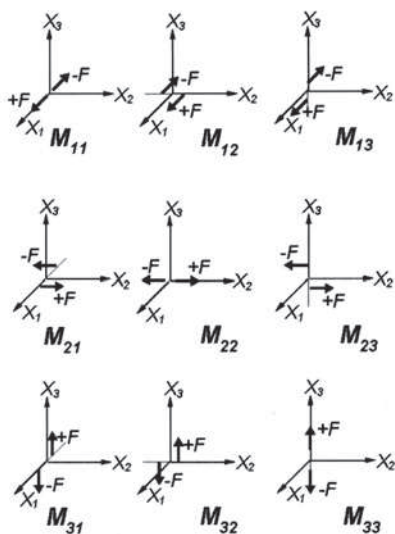


Rys. 2. Powstawanie wstrząsów w różnych sytuacjach górniczych [7]: 1 – zawał, 2 – pęknięcie filara, 3 – tensyjne pęknięcie stropu nad wyrobiskiem, 4 – pęknięcie normalne w stropie, 5 – pęknięcie odwrócone przy maksymalnych naprężeniach poziomych, 6 – odwrócone pęknięcie pologie wskutek rozwarstwienia stropu

Fig. 2. Schematic diagram of possible ways in which mine-induced tremors can occur [5]: 1 – cavity collapse, 2 – pillar burst, 3 – tensional fault in roof rocks, 4 – normal fault, 5 – thrust fault in condition of maximal horizontal stress, 6 – shallow (near horizontal) thrust faulting

Do określania mechanizmu ognisk wstrząsów górotworu stosuje się metodę inwersji tensora momentu sejsmicznego. Tensor momentu sejsmicznego opisuje układ sił działających w źródle sejsmicznym jako liniową kombinację par sił. Tensor ten opisuje źródło sejsmiczne w sposób zupełny i stanowi najpełniejszy opis systemu sił występujących w ognisku wstrząsu [2]. Tensor momentu sejsmicznego można przedstawić w sposób graficzny jako układ dziewięciu par sił równoważnych M_{ij} działających w ognisku wstrząsu (rys. 3). Natomiast w zapisie cyfrowym przedstawiany jest jako macierz 9 składowych tensora $M(M_{ij})$. Przesunięcia w polu dalekim wywołane przez system sił występujących w źródle sejsmicznym są sumą przemieszczeń wywołanych przez poszczególne pary sił [1].

Inwersja tensora momentu sejsmicznego polega na obliczeniu jego składowych na podstawie zarejestrowanego przez sieć sejsmologiczną pola przemieszczeń. Następnie przeprowadza się dekompozycję tensora momentu sejsmicznego na część izotropową (opisującą zmiany objętościowe w źródle)



Rys. 3. Układ dziewięciu par sił równoważnych M_{ij} działających w ognisku wstrząsu [1]

Fig. 3. The model of nine possible pair of forces, equivalent to M_{ij} , acting at a seismic source [1]

oraz dewiatorową, którą można dalej rozłożyć na liniowy skompensowany dipol wektorowy (CLVD) i podwójną parę sił (DBCP). Jest to najczęściej przyjmowany opis źródła sejsmicznego w górnictwie [5, 10, 11, 12, 16]. Niestety ta część dekompozycji jest niejednoznaczna. Część izotropowa (I) opisuje zmiany objętości w źródle („+” - eksplozja, „-” - implozja). Liniowy skompensowany dipol wektorowy (CLVD) opisuje mechanizm zbliżony do jednoosiowego ściskania („-”) lub rozciągania („+”). Podwójna para sił (DBCP) dotyczy procesów ścinania i poślizgu. Standardowo określa się trzy modele ogniska wstrząsu opisane przez trzy rodzaje tensora momentu sejsmicznego: pełny (zawierający: I, CLVD, DBCP), dewiatoryczny (zawierający: CLVD, DBCP) oraz czystego ścinania (zawierający wyłącznie DBCP). W przypadku pełnego tensora momentu sejsmicznego, przewaga części izotropowej (I) występuje dla wstrząsów górotworu powstających np. w wyniku nacisku na pokład nadległych warstw skalnych i przekroczenia jego wytrzymałości na ściskanie (mechanizm eksplozywny) czy wstrząsów związanych z zawałaniem się skał stropowych do pustki wytworzonej w wyniku eksploatacji (mechanizm implozywny). Liniowy skompensowany dipol wektorowy (CLVD) może opisywać pęknięcie filarów. Mechanizm, w którym dominuje podwójna para sił (DBCP) dotyczy wstrząsów związanych głównie z pękaniem znajdujących się w stropie pokładu grubych warstw skalnych i cechujących się dużą sztywnością i wytrzymałością (np. grubej warstwy mocnych skał) lub uaktywnianiem się występujących w górotworze uskoków. Stosując metodę inwersji momentu sejsmicznego otrzymuje się procentowy udział w mechanizmie wstrząsu trzech składowych tensora: składowej izotropowej I, składowej CLVD i składowej ścinającej DBCP [6, 17].

6. Wyniki obliczeń mechanizmu ognisk wysokoenergetycznych wstrząsów

Obliczenia tensora momentu sejsmicznego zostały wykonane w programie FOCI [8] w oparciu o inwersję amplitud pierwszych wstąpień fali P, przy uwzględnieniu kierunków pierwszych wychyleń w domenie czasu. Na podstawie zapisów kopalnianej sieci sejsmologicznej obliczono mechanizmy ognisk wysokoenergetycznych wstrząsów w rejonie

przedmiotowej ściany w okresie pół roku od jej uruchomienia. Stanowiska sejsmometryczne były rozmieszczone równomiernie i optymalnie wokół objętej badaniami ściany.

Błąd wyznaczenia epicentrum wstrząsu osiągał maksymalnie wartość około 35 m, natomiast błąd wyznaczenia hipocentrum wstrząsu w rejonie wytypowanej ściany był większy i w skrajnych przypadkach osiągał wartość ponad 60 m. Przedstawione oszacowania błędów określono w oparciu o prace Drzęzli (1992) oraz Drzęzli i Dubińskiego (2001), przyjmując dokładność wyznaczenia pierwszego wstąpienia fali podłużnej na poziomie 5 ms. Prędkość rozchodzenia się fali podłużnej przyjęto na poziomie 4000 m/s.

Przyjęto zatem poprawne określenie poziomych współrzędnych ognisk objętych badaniami wstrząsów. Dokonano natomiast udokładnienia składowej pionowej ognisk tych wstrząsów w programie FOCI [8], przyjmując rozwiązanie tensora momentu sejsmicznego dla największej wartości współczynnika jakości rozwiązania, uwzględniającego konfigurację stanowisk oraz najmniejszego błędu jego wyznaczenia. Odpowiednio zakładając zmienną głębokość ognisk wstrząsów uzyskano każdorazowo najlepsze rozwiązanie tensora momentu sejsmicznego. Błąd wyznaczenia najlepszego rozwiązania tensora momentu sejsmicznego był mniejszy średnio o około 30% (w skrajnych przypadkach nawet o około 60%) w porównaniu do błędu wyznaczenia tensora momentu

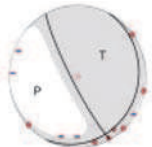



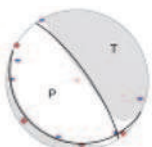
sejsmicznego dla głębokości ogniska przed jej udokładnieniem. Współczynnik jakości rozwiązania wykazywał mniejszą zmienność, w większości przypadków do kilku procent.

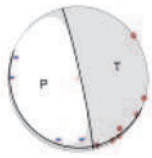
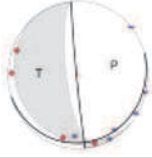

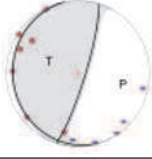

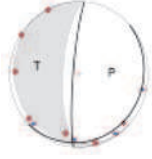
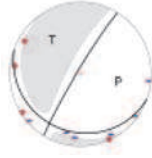
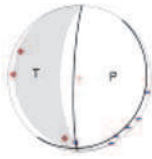
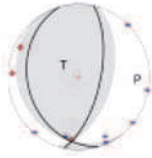
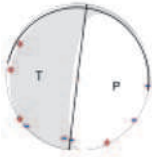
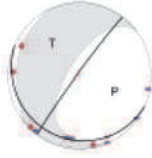
Wyniki obliczeń mechanizmów wysokoenergetycznych wstrząsów, jakie wystąpiły w okresie pierwszych 6 miesięcy biegu objętej badaniami ściany, w zmiennych warunkach górniczo-geologicznych zebrano w tabeli 1.

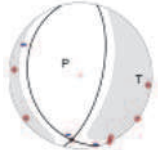
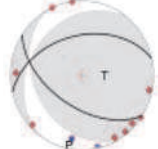

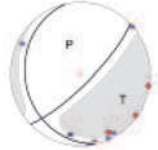
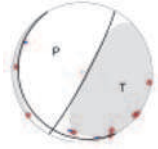
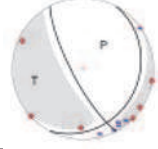
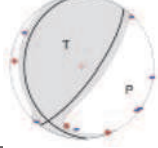



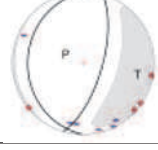
Dominującym typem mechanizmu analizowanych ognisk wstrząsów wysokoenergetycznych był mechanizm poślizgowy (blisko 89%). Ogniska tych wstrząsów zawierały od ponad 41% do ponad 89% składowej ścinającej (średnio około 61%). Udział składowej izotropowej I w ogniskach tych wstrząsów wynosił średnio około 20%, a składowej CLVD około 19%. Dominujący był tutaj mechanizm poślizgowy normalny (75% przypadków), natomiast w 25% ognisk wstrząsów o mechanizmie poślizgowym przemieszczenie następowało na uskośku odwróconym.

W około 11% analizowanych ognisk wstrząsów stwierdzono występowanie mechanizmu implozyjnego. Sytuacja taka dotyczyła wstrząsów o mniejszych energiach, tj. do maksymalnie $5 \cdot 10^5$ J. Udział składowej I był tutaj największy i wynosił średnio około 45%. Udział składowej CLVD (jednoosiowego ściskania) w ogniskach tych wstrząsów był nieznacznie mniejszy i wynosił średnio około 41%. Składowa ścinająca DBCP miała w ogniskach tych wstrząsów najmniej udział – średnio około 14%.

Tabela 1. Parametry sejsmologiczne i mechanizmu ognisk wysokoenergetycznych wstrząsów
Table 1. Seismological and focal mechanism parameters of high-energy tremors

Lp.	Data Godzina	Energia, J	Odległość od frontu ściany, m ¹	Współrzędna Z, m ²	Parametry płaszczyzn nodalnych ³		Składowe tensora, %			Typ mechanizmu ⁴
					$\Phi A / \delta A$ λA	$\Phi B / \delta B$ λB	I	CLVD	DBCP	
1.	2012-11-13 03:07	4.0E+5	-20	-513	152,0/82,7 79,6	27,3/12,7 144,6	22.7	14	63.3	RE 
2.	2012-11-17 10:27	9.0E+5	-30	-502	154,9/84,3 81,1	32,6/10,5 147,3	19	9.6	71.3	RE 
3.	2012-11-20 10:41	3.0E+6	-70	-529	15,1/49,1 114,0	161,0/46,3 64,9	22	22	56	RE 
4.	2012-11-27 22:26	1.0E+7	-100	-555	253,3/69,2 -101,9	103,9/23,8 -61,6	-19.2	-8.4	72.3	NO 
5.	2012-12-16 05:39	9.0E+5	-110	-633	324,5/77,5 -83,1	115,5/14,2 -118,2	6.7	14.4	78.9	NO 

6.	2012-12-21 07:56	2.0E+6	-90	-516	347,2/86,6 -85,5	113,8/5,6 143,2	-1.1	-9.8	89.1	NO	
7.	2012-12-23 19:46	9.0E+6	-20	-511	174,2/88,2 -98,6	72,9/8,8 -11,5	-22.2	-23.1	54.7	NO	
8.	2013-01-11 16:35	9.0E+5	-110	-576	278,2/55,6 -87,7	94,2/34,5 -93,3	-37.9	-18.2	43.9	NO	
9.	2013-01-11 23:21	4.0E+6	-20	-628	17,3/81,6 94,5	169,0/9,5 62,0	8.6	4.6	86.8	RE	
10.	2013-01-19 02:23	5.0E+5	-20	-635	152,8/56,5 -91,4	335,5/33,5 -87,9	-43.4	-38.5	18.1	IMPL	
11.	2013-01-24 02:38	9.0E+6	-50	-609	184,6/83,2 -96,2	47,4/9,2 -47,6	-23.5	24	52.5	NO	
12.	2013-02-02 15:44	8.0E+5	-20	-551	211,4/85,8 -110,0	110,0/20,4 -12,1	-23.8	-21.6	54.6	NO	
13.	2013-02-06 20:33	9.0E+5	-70	-569	181,9/83,1 94,8	36,6/8,4 55,5	-29	-29.9	41.1	NO	
14.	2013-02-16 22:23	7.0E+5	40	-515	12,0/64,9 102,9	163,8/28,0 64,6	28	27.9	44.1	RE	
15.	2013-02-19 06:22	8.0E+5	-30	-523	187,1/89,6 -84,5	280,8/5,5 -176,2	-12	-16.4	71.5	NO	
16.	2013-03-02 02:38	1.0E+6	20	-543	216,8/87,1 -102,8	114,3/13,1 -12,8	-18.1	-35.4	46.5	NO	

17.	2013-03-06 03:28	8.0E+5	30	-550	13,5/65,3 -76,9	164,4/27,8 -116,2	-23.7	-19.8	56.5	NO	
18.	2013-03-08 22:26	8.0E+5	-50	-553	33,0/76,1 -73,6	162,2/21,4 -138,7	-16.6	-7.2	76.2	NO	
19.	2013-03-11 21:30	8.0E+5	-30	-569	20,5/62,4 -73,0	167,1/32,1 -119,2	-29.2	-24.4	46.4	NO	
20.	2013-03-14 17:40	4.0E+5	-30	-514	45,5/78,0 -71,6	167,6/21,9 -146,0	-21.3	-15.1	63.6	NO	
21.	2013-03-15 20:49	9.0E+5	-60	-544	28,1/84,2 -81,0	150,7/10,7 -147,0	0.8	16.9	82.3	NO	
22.	2013-03-19 12:28	4.0E+5	-130	-560	152,1/78,0 -106,0	27,9/21,9 -36,2	-21.9	-12.1	66	NO	
23.	2013-03-23 15:14	9.0E+5	30	-500	35,8/74,2 102,8	176,0/20,2 52,0	20.2	15.2	64.6	RE	
24.	2013-04-01 16:16	3.0E+5	40	-575	154,7/66,5 -94,5	345,8/23,9 -79,8	-42.7	-34.2	23.1	IMPL	
25.	2013-04-05 17:43	9.0E+5	-10	-543	248,2/69,4 -108,6	111,8/27,5 -49,7	-27.3	-21.1	51.6	NO	
26.	2013-04-15 20:40	2.0E+5	-180	-588	103,1/58,3 -68,1	245,7/37,9 -121,1	-48.4	-49.7	1.8	IMPL	
27.	2013-04-29 18:09	5.0E+5	-150	-537	16,1/68 -84,3	181,2/22,7 -103,9	-33.9	-28.2	37.9	NO	

¹ „-” – za frontem ściany, „+” – przed frontem ściany,

² głębokość ognisk określona z dopasowania rozwiązania wg programu FOCI,

³ Φ_A , Φ_B – azymuty płaszczyzn nodalnych A, B, δ_A , δ_B – upady płaszczyzn nodalnych A, B, λ_A , λ_B – kąty poślizgu związane z płaszczyznami nodalnymi A, B (wyrażone w stopniach),

⁴ typ mechanizmu: NO – poślizgowy normalny, RE – poślizgowy odwrócony, IMPL – implozja.

Początkowo występujące wysokoenergetyczne wstrząsy (1-3) związane były najprawdopodobniej z naruszeniem równowagi naprężeniowej występującej w filarze dla przekopów skrzydłowych, wytworzonej podczas wieloletniej i wielopokładowej eksploatacji. Wstrząsy te lokalizowały się w caliznie, za frontem ściany. Wstrząsy te cechowały się mechanizmem poślizgowym odwróconym, a udział składowej ścinającej wynosił średnio około 64%. W rozwiązaniach mechanizmów tych ognisk azymut jednej z płaszczyzn nodalnych korelował się wyraźnie z krawędziami eksploatacyjnymi wytworzonymi w pokładach wyżej zalegających i zawierał się w przedziale od 152°-161°. Upad rozpatrywanych płaszczyzn nodalnych zawierał się w przedziale od ponad 46° do około 84°.

Wystąpienie wysokoenergetycznych wstrząsów 4-6 i 8 wiązało się najprawdopodobniej z uaktywnieniem się uskoku o zrzucie 25 m w wyniku rozpoczętej eksploatacji. Wstrząs nr 4 o energii $1 \cdot 10^7$ J, był najsilniejszym w rejonie analizowanej ściany. Udział składowej ścinającej w ogniskach ww. wstrząsów wynosił średnio około 71%, a przemieszczenie następowało zgodnie z otrzymanym mechanizmem na uskoku normalnym. Azymut jednej z płaszczyzn nodalnych tych wstrząsów (średnio około 300°) pokrywał się w dużym stopniu z przebiegiem uskoku o zrzucie 25 m, tj. NW-SE. Upad rozpatrywanych płaszczyzn nodalnych zawierał się w przedziale od około 56° do około 87° (średnio 72°). Przemieszczenie mas skalnych dla rozpatrywanych płaszczyzn nodalnych było zgodne ze zrzutem uskoku 25 m.

Po uzyskaniu przez ścianę około 40 m postępu wystąpił pierwszy wstrząs związany najprawdopodobniej z pęknięciem w grubej warstwie piaskowca (wstrząs nr 7). Kolejne tego typu wstrząsy występowały systematycznie podczas dalszego biegu ściany, w analizowanym oknie czasowym (wstrząsy nr 11, 13, 15, 17-22, 27). Uwzględniając typ mechanizmu ognisk oraz ich głębokość, a także parametry jednej z płaszczyzn nodalnych można stwierdzić, iż wymienione wstrząsy związane były z typowymi procesami destrukcji górotworu, zachodzącymi w wyniku pęknięcia grubej warstwy piaskowca, powodowanymi postępującą ścianą. W ogniskach tych wstrząsów udział składowej ścinającej wynosił średnio około 59%. Azymut rozciągłości jednej z płaszczyzn nodalnych korelował się wyraźnie z frontem ściany, tj. zawierał się w przedziale od blisko 151° do ponad 187°. Upad rozpatrywanych płaszczyzn nodalnych wynosił średnio około 51°. Przemieszczenie następowało w kierunku wytwarzanych zrobów (kąt poślizgu płaszczyzn nodalnych- λ zawierał się w przedziale od -84,5° do -147°, średnio około -114°).

Po okresie rozruchu ściany, w jej rejonie wystąpiły również 3 wstrząsy (nr 9, 14, 23) o mechanizmie poślizgowym odwróconym. Wstrząsy te lokalizowały się stosunkowo blisko frontu ściany, tj. od -20 m za do 40 m przed frontem ściany. Azymut rozciągłości jednej z płaszczyzn nodalnych korelował się wyraźnie z frontem ściany (od około 164° do około 176°). Upad rozpatrywanych płaszczyzn nodalnych zawierał się w przedziale od około 10° do około 28°. W ogniskach tych wstrząsów doszło najprawdopodobniej do pogołego, odwróconego pęknięcia wskutek rozwarstwienia stropu. Co świadczy o wysokiej składowej poziomej naprężeniu.

Pośród zarejestrowanych w analizowanym oknie czasowym wysokoenergetycznych wstrząsów dwa z nich, tj. nr 16 i 25 prawdopodobnie były związane z występowaniem w polu ściany strefy zaburzeń tektonicznych w postaci serii uskoków o przebiegu od SW-NE do WNW-ESE i zrzucie do 5,5 m oraz o nachyleniu płaszczyzn uskokowych w przedziale od około 20° do około 90°. W rejonie tej strefy górotwór najprawdopodobniej był znacznie osłabiony. W ogniskach wspomnianych wstrząsów przemieszczenie następowało na uskoku normalnym, a udział składowej ścinającej wynosił odpowiednio

46,5° i 51,6°. Udział implozji oraz jednoosiowego ściskania również był wyraźny w ogniskach tych wstrząsów. Azymut jednej z płaszczyzn nodalnych tych wstrząsów, pokrywał się w dużym stopniu z przebiegiem wspomnianej strefy zaburzeń tektonicznych (odpowiednio 217° i 248°). Upad rozpatrywanych płaszczyzn nodalnych wynosił odpowiednio około 69° i około 87°.

Pośród analizowanych wstrząsów jeden z nich, tj. wstrząs nr 12 wystąpił znacznie na północ od pola ściany, w zrobach wyeksploatowanego górnego piętra ścianowego, w rejonie krawędzi pokładu 501 oraz krawędzi pokładu 506, zalegającego w odległości około 45 m nad pokładem 510. Analiza mechanizmu ogniska wykazała, że dominowało tutaj ścinanie (54,6%). Udział implozji i jednoosiowego ściskania kształtował się na podobnym poziomie, tzn. 23,8% oraz 21,6%. Azymut jednej z płaszczyzn nodalnych, pokrywał się w dużym stopniu z przebiegiem zaszłości eksploatacyjnych, w rejonie których ognisko wstrząsu zostało zlokalizowane (211°). Upad wspomnianej płaszczyzny nodalnej wynosił około 86°. Uwzględniając lokalizację ogniska wstrząsu, w tym głębokość ogniska określoną z dopasowania rozwiązania według programu FOCI oraz samo rozwiązanie mechanizmu ogniska, można przypuszczać, iż doszło tutaj do pęknięcia we wstrząsogennej warstwie piaskowca, wskutek naruszenia równowagi naprężeniowej w rejonie pozostawionych zaszłości eksploatacyjnych w pokładach wyżej zalegających w wyniku prowadzonej eksploatacji.

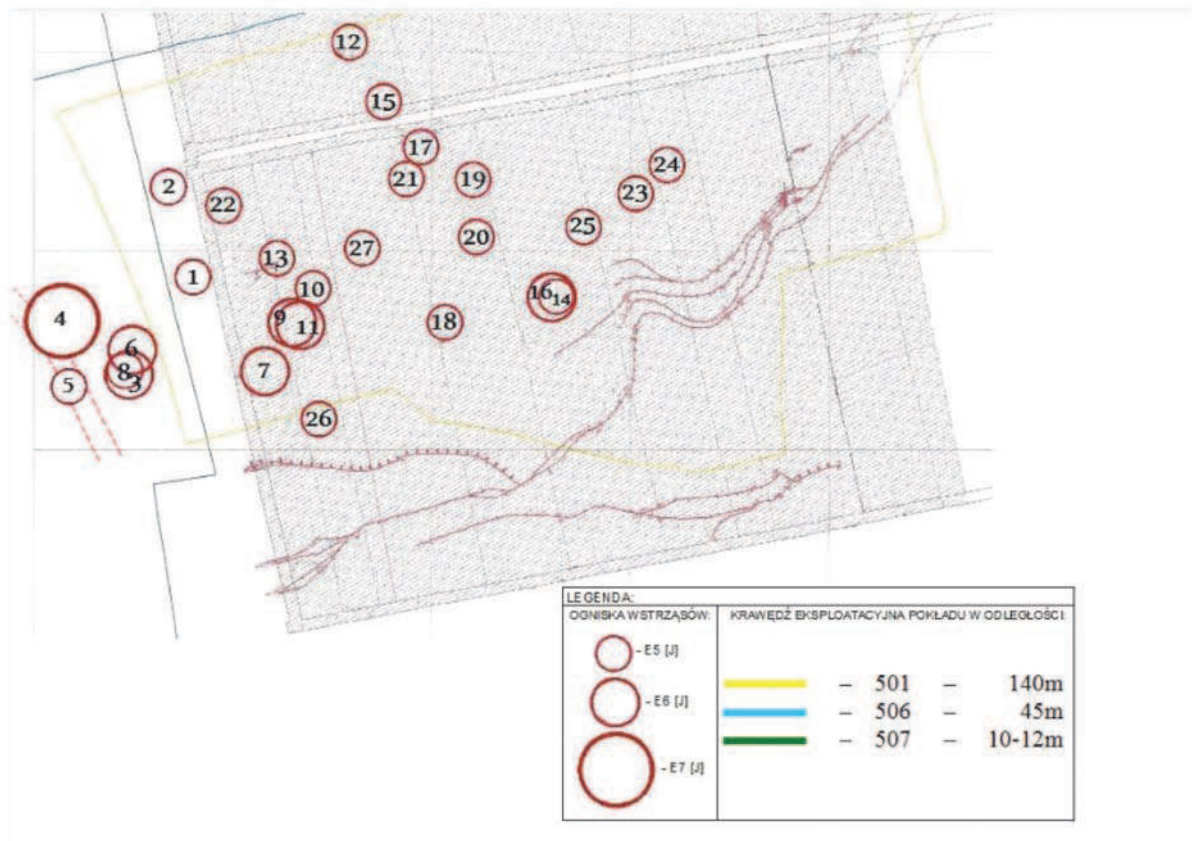
Podczas prowadzonej eksploatacji stwierdzono wyraźny udział czynników geologiczno-górnicych występujących w rejonie objętej badaniami ściany na proces powstawania wysokoenergetycznych wstrząsów. Położenie epicentrow wysokoenergetycznych wstrząsów, które wystąpiły w rejonie objętej badaniami ściany, w przyjętym oknie czasowym przedstawiono na mapie pokładu 510 (rys. 4).

7. Podsumowanie

Badania mechanizmu ognisk wstrząsów umożliwiają poznanie najbardziej prawdopodobnych przyczyn powstawania wysokoenergetycznych wstrząsów górotworu oraz wyciągnięcia wniosków o stanie naprężeń w górotworze podczas prowadzonej eksploatacji ścianowej. Wiedza ta może być przydatna zarówno w poprawniejszej ocenie stanu zagrożenia tąpnięciami metodą sejsmologiczną, jak i ustalaniu odpowiednich kroków w ramach aktywnej profilaktyki przeciwno tąpniowej.

Przeprowadzone badania pozwoliły ustalić prawdopodobny przebieg procesów odpowiedzialnych za powstawanie wysokoenergetycznych wstrząsów indukowanych eksploatacją pokładu 510 wytypowaną ścianą, w zróżnicowanych warunkach górniczo-geologicznych.

Eksploatacja w skomplikowanych warunkach górniczo-geologicznych skutkowałą wieloźródłowością wysokoenergetycznych wstrząsów górniczych. Występowanie wstrząsów związane było w początkowym okresie z uaktywnieniem się uskoku o zrzucie 25 m oraz z naruszeniem równowagi naprężeniowej w filarze dla przekopów skrzydłowych, tj. z czynnikami występującymi poza polem objętej badaniami ściany. W dalszym okresie wstrząsy wysokoenergetyczne powstawały głównie w polu ściany, w związku z procesami pęknięcia wstrząsogennej warstwy piaskowca zalegającej w znacznej odległości nad eksploatowanym pokładem. Wstrząsy powstawały również w wyniku tworzenia się zawału skał stropowych oraz naruszenia równowagi naprężeniowej w rejonie zaszłości eksploatacyjnych w pokładach wyżej zalegających.



Rys. 4. Położenie epicentrów wysokoenergetycznych wstrząsów na mapie pokładu 510

Fig. 4. Location of epicenters of high-energy tremors on the map of the coal seam no. 510

Obserwacja zmienności mechanizmu ognisk wstrząsów w korelacji z warunkami górniczo-geologicznymi podczas prowadzonej eksploatacji umożliwiła rozpoznanie źródeł zagrożenia sejsmicznego.

Literatura

1. *Aki K., Richards P. G.*: Quantitative Seismology – Theory and Methods, W.H. Freeman & Co., vol. 1, 2, San Francisco, 1980.
2. *Backus G., Mulcahy M.*: Moment Tensor and Other Phenomenological Description of Seismic Sources, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 1976, s. 341-361.
3. *Drzęźła B.*: Teoretyczne i praktyczne zasady oceny błędów lokalizacji ognisk wstrząsów oraz projektowania sieci sejsmometrów, *Materiały III Szkoły Geofizyki Górniczej*, Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice 1992, s. 126-141.
4. *Drzęźła B., Dubiński J.*: Lokalizacja ognisk wstrząsów górniczych, w: *Badania geofizyczne w kopalniach*, praca zbiorowa pod red. J. Dubińskiego, Z. Pileckiego i W. M. Zuberka, Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków 2001, s. 72-95.
5. *Gibowicz S. J.*: Mechanizm ognisk wstrząsów. Wstrząsy górnicze – mechanizm, lokalizacja i energia, *Szkoła Eksploatacji Podziemnej*, Szczyrk 1995, s. 5-30.
6. *Gibowicz S. J., Kijko A.*: An introduction to mining seismology. *Int. Geoph. Series*, vol.55, Academic Press, San Diego, New York, 1994 p. 209-216.
7. *Hasegawa H. S., Wetmiller R. J., Gendzwill D. J.*: Induced Seismicity in Mines in Canada – An Overview, *PAGEOPH*, Vol. 129, Nos. 3/4, 1989, s. 423-453.
8. *Kwiatek G.*: Foci – tensor momentu sejsmicznego – parametry spektralne. Opis programu, publikacja internetowa: www.sejsmologia-gornicza.pl/foci/download.php, 2009
9. *Kwiatek G., Charalampidou E.-M., Dresden G., Stanchits S.*: An improved method for seismic moment tensor inversion of acoustic emission through assessment of sensor coupling and sensitivity to incidence angle, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 65, 2014, s. 153-161.
10. *Marcak H., Zuberek W. M.*: *Geofizyka górnicza*, Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice 1994, s. 143-150.
11. *Stec K.*: Metody wyznaczania mechanizmu ognisk wstrząsów, *Prace Naukowe GIG „Górnictwo i Środowisko”*, 2009a, Nr 4/1, s. 223-237
12. *Stec K.*: Mechanizm ogniska wstrząsu i metody jego wyznaczania, *Warsztaty z cyklu „Zagrożenia naturalne w górnictwie”*, 2009b, s. 287-305.
13. *Stec K., Pałyńska R., Konopko W.*: Próba zweryfikowania zapisów względnej aktywności górotworu generowanej robotami górniczymi w GZW w latach 1988-1998, *Prace Naukowe GIG „Górnictwo i Środowisko”*, 2011, Nr 4/2, s. 451-454.
14. *Stec K., Wojtecki Ł.*: Charakterystyka mechanizmu ognisk wstrząsów górotworu związanych z eksploatacją pokładu 510 ścianą 502 w Kopalni Węgla Kamiennego „Bielszowice”, w: *Prace Naukowe GIG „Górnictwo i Środowisko”*, 2011, s. 61-77.
15. *Wiejacz P.*: *Badania mechanizmów wstrząsów górniczych w Polsce*, w: *Badania geofizyczne w kopalniach*, praca zbiorowa pod red. J. Dubińskiego, Z. Pileckiego, W. M. Zuberka, Wydawnictwo IGSMiE, Kraków 2001, s. 25-33.
16. *Wojtecki Ł., Talaga A., Mendecki M. J., Zuberek W. M.*: The Estimation of the Torpedo Blasting Effectiveness Based on the Analysis of the Focal Mechanisms of Induced Mining Tremors in Bielszowice Coal Mine, *EUROCK 2013: Rock Mechanics for Resources, Energy and Environment*, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013, s. 769-774.
17. *Zuberek W.M., Dubiel R., Pierwola J.*: Tensor momentu sejsmicznego wstrząsów górniczych i tąpnięć z rejonu siodła głównego GZW, *Materiały Szkoły Eksploatacji Podziemnej*, Kraków 1998, s. 383-393.