



Analiza zmian tensora momentu sejsmicznego i parametrów źródła wstrząsów górniczych w czasie eksploatacji pokładu 510 ścianą 577a w pokładzie 510 w KWK Mysłówice-Wesoła

Analysis of seismic moment tensor changes and mining shock source parameters during the mining of the coal seam 510 by longwall 577a in KWK Mysłówice-Wesoła

Mgr inż. Krzysztof Misz^{*)}

Treść: Obserwowana w ostatnich latach rosnąca liczba zarejestrowanych zjawisk sejsmicznych o energiach $\geq 10^6$ J oraz liczba zarejestrowanych tąpnięć i odprężeń, z uwagi na brak możliwości precyzyjnej predykcji tego zagrożenia, wymusza potrzebę wzbogacenia aktualnie wykorzystywanych metod oceny zagrożenia tąpnięciami i wstrząsami o nowe narzędzia. W artykule przedstawiono kształtowanie się stanu zagrożenia tąpnięciami w czasie eksploatacji pokładu 510 ścianą 577a w KWK Mysłówice-Wesoła oraz przedstawiono możliwe przyczyny towarzyszącej jej wzmożonej aktywności sejsmicznej. Przedstawiono również zależności pomiędzy obserwowaną aktywnością sejsmiczną a parametrami opisującymi mechanizmy ognisk zarejestrowanych wstrząsów. Wykazano, że naprężenie pozorne, podobnie jak energia sejsmiczna czy moment sejsmiczny, może stanowić kryterium do oceny stanu zagrożenia tąpnięciami i wstrząsami.

Abstract: The growing number of recorded seismic events observed in recent years about energies $\geq 10^6$ J and the number of recorded rockbursts and stress reliefs, due to the inability to accurately predict this threat, enforces the need to enrich the currently used methods of rockburst and shock hazard by new tools. The article presents the evolution of the state of threat of rock bursting during the extraction of the 510 coal seam through the longwall 577a in the KWK Mysłówice-Wesoła and presents the possible causes of seismic activity. Presented also the relations between the observed seismic activity and parameters describing the mechanisms of focuses of registered shocks. It has been shown that apparent stress, similar as seismic energy or seismic moment, can be a criterion for assessing the state of rockburst hazard and shock hazard.

Słowa kluczowe:

aktywność sejsmiczna, mechanizm ognisk, parametry spektralne

Key words:

seismic activity, focal mechanism, spectral parameters

1. Wstęp

Zagrożenie tąpnięciami i wstrząsami, z uwagi na systematyczne szczypanie złoża i tym samym konieczność zwiększania głębokości prowadzonych robót górniczych, staje się dominującym zagrożeniem występującym w kopalniach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, czego dowodem jest rejestrowana w ostatnich latach rosnąca liczba zjawisk sejsmicznych o energiach $\geq 10^6$ J oraz liczba zarejestrowanych tąpnięć i odprężeń. Jednak z uwagi na brak możliwości precyzyjnej predykcji tego zagrożenia aktualnie wykorzystywanymi metodami, zachodzi potrzeba wzbogacenia metod oceny zagrożenia tąpnięciami i wstrząsami o nowe narzędzia.

Prowadzone od lat 90. ubiegłego wieku badania mechanizmu ognisk rejestrowanych zjawisk sejsmicznych potwierdzają fakt występowania różnych typów ognisk wstrząsów, a charakteryzujące je parametry wykazują związek z lokalną budową geologiczną i warunkami górniczymi kształtowanymi przez sytuację górniczą oraz parametry techniczne eksploatacji (Stec 2007).

W artykule podjęto próbę wyznaczenia zależności pomiędzy rejestrowaną aktywnością sejsmiczną, warunkami geologicznymi i górniczymi w rejonie prowadzonych robót

z zmianami mechanizmów ogniska wstrząsów sejsmicznych i definiujących je parametrów spektralnych, na przykładzie ściany 577a w pokładzie 510, w polu B1, w PGG S.A. Oddział KWK Mysłówice-Wesoła.

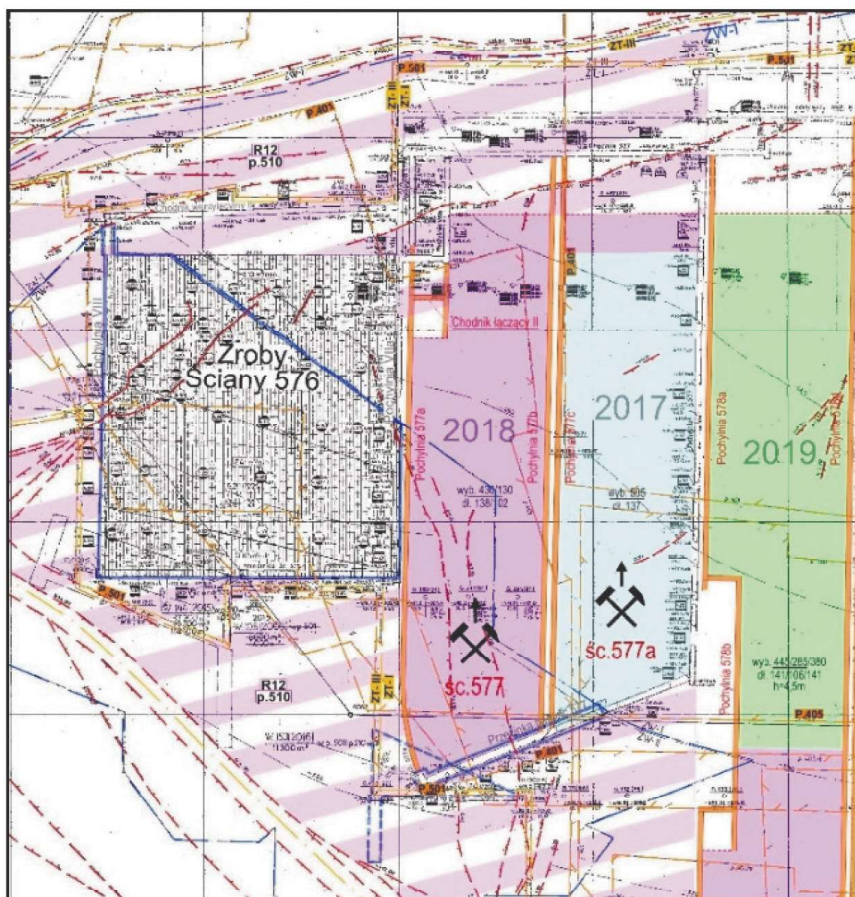
1.1. Warunki geologiczno-górnice i dokonana eksploatacja w partii B, polu B1

Partia B zlokalizowana jest w części północno-zachodniej pola macierzystego, gdzie rozciągłość warstw karbońskich zbliżona jest do równoleżnikowej, zaś ich zapadanie przebiega z północy na południe pod kątem 4° - 6° . Jej granice tworzą następujące dyslokacje tektoniczne:

- od północy uskoki „Wesoła” o rzucie od 17 do 25 m,
- od wschodu uskoki „Mysłowicki” o rzucie od 27 do 80 m, uskoki „Laryski” o rzucie do 11 m, uskoki Makowski o rzucie do 41 m oraz uskoki o rzucie $3 \div 15$ m (pomiędzy uskokiemi „Luiza” a „Międzyszybowym”),
- od południa uskoki „Międzyszybowy” o rzucie do 38 m,
- od zachodu uskoki „Jakub” o rzucie do 80 m.

Partia B jest podzielona na cztery pola noszące nazwy: B1, B2, B3 i B4. Granice podziału pól stanowią uskoki o mniejszych wielkościach rzutu oraz filary ochronne. Pole B1 stanowiące zachodnią część partii B, ograniczone jest od wschodu filarem ochronnym dla przekopów na poziomie 665 m i szybów wentylacyjnych. Granicę północną stanowi uskoki

^{*)} PGG S.A. Oddział KWK Mysłówice-Wesoła



Rys. 1. Zrealizowana i projektowana eksploatacja pokładu 510 w zachodniej części pola B1 do czasu uruchomienia ściany 577a

Fig. 1. Completed and planned exploitation of seam 510 in the western part of field B1 until commissioning of longwall 577a

Wesoła, granicę południową – uskok „Międzyszybowy”, a zachodnią uskok „Jakub”.

Do chwili obecnej w polu B1 prowadzono eksploatację (do wysokości 250 m nad pokładem 510) pokładów: 401, 404/5, 405/1, 405/2, 418 i 501. Aktualnie prowadzona jest eksploatacja podstropowej warstwy pokładu 510. Pierwszą wybraną ścianą w tym pokładzie była ściana 576, następnie ściana 577a i 590. Miąższość pokładu 510 w przedmiotowym rejonie wynosi od 7,3 m do 10,3 m.

Na rysunku 1 przedstawiona została dokonana i projektowana eksploatacja pokładu 510 w zachodniej części pola B1 do czasu uruchomienia ściany 577a, a na rysunku 2 pakiet skał stropowych nad i pod pokładem 510 wg otworu G-2/1957.

1.2. Aktywność sejsmiczna

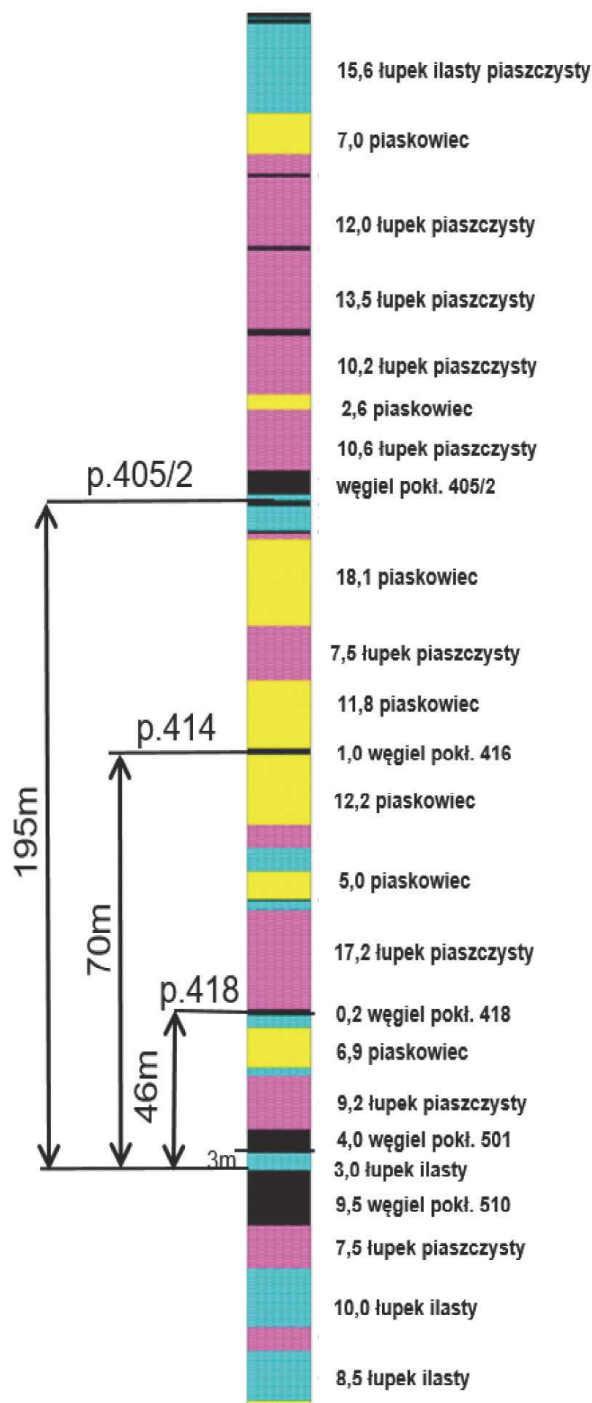
W polu B1 w trakcie prowadzenia eksploatacji pokładu 501 rejestrowano wysoki poziom aktywności sejsmicznej, o czym świadczą wstrząsy o energiach rzędu 10^5 i 10^6 J (w tym 7 tąpnięć). Zestawienie aktywności sejsmicznej towarzyszącej eksploatacji pokładu 501 zamieszczono w tabeli 1. W 2015 r. rozpoczęto eksploatację pokładu 510 ścianą 576, w czasie prowadzenia której rejestrowano bardzo niską aktywność sejsmiczną, łącznie 156 wstrząsów sejsmicznych o sumarycznej energii $0,58 \cdot 10^6$ J i nie rejestrowano wstrząsów o energiach $\geq 10^5$ J. Kolejną ścianą przewidzianą do eksploatacji była ściana 577a. W czasie prowadzenia robót górniczych związanych z rozcięciem parceli przed-

miotowej ściany, tj. drążeniem pochylni 577 zarejestrowano wzrost aktywności sejsmicznej związany z prowadzeniem robót w bliskim sąsiedztwie pasa calizny węglowej (widocznym na rys. 3), pozostawionej po zmianie projektu ściany 16 i uruchomieniu eksploatacji ścianą 1016a w pokładzie 501. Napotkane problemy górnicze związane z opadem skał stropowych przy towarzyszącej silnej aktywności sejsmicznej zmusiły kierownictwo kopalni do zakończenia drążenia pochylni 577 i zmiany projektu parceli ściany. Finalny zakres eksploatacji pokładu 510 ścianą 577a przedstawiono na rys. 1.

W czasie eksploatacji pokładu 510 ścianą 577a aktywność sejsmiczna gwałtownie wzrosła. W pierwszej fazie eksploatacji, na odcinku ok. 65m postępu ściany, zarejestrowano 120 wstrząsów o sumarycznej energii $15,0 \cdot 10^6$ J, w tym: 22 rzędu 10^2 , 60 rzędu 10^3 , 28 rzędu 10^4 , 8 rzędu 10^5 i 2 rzędu 10^6 . Po wstrząsie o energii $9 \cdot 10^6$ J, którego skutki zakwalifikowano jako odprężenie, wstrzymano dalszą eksploatację przedmiotową ścianą i z uwagi na rejestrowaną aktywność sejsmiczną i nieakceptowalny poziom zagrożenia tąpnięciami w rejonie podjęto decyzję o zmianie projektu eksploatacji ściany 577a.

Zestawienie aktywności sejsmicznej w czasie prowadzenia eksploatacji pokładu 510 ścianami 576 i 577a zamieszczono w tabeli 2, a na rys. 3 przedstawiono lokalizację ognisk wstrząsów sejsmicznych o energii $\geq 10^4$ J, zarejestrowanych w trakcie prowadzenia eksploatacji ścianą 577a wraz z naniesioną projekcją dokonanej eksploatacji w pokładzie 501.

Pole B1 (wg otworu G-2/1957)	
pokład 401/1	
2,0 m łupek ilasty + 0,4 m węgiel + 0,7 m łupek ilasty	
pokład 401	
11,2 m łupek piaszczysty + 1,0 m piaskowiec + 2,9 m łupek ilasty	
pokład 404/1g	
6,8 m łupek ilasty	
pokład 404/1d	
14,4m łupek ilasty miejscami piaszczysty + 0,5 m węgiel + 4,4 m piaskowiec + 22,2 m łupek ilasty miejscami piaszczysty + 0,6 m węgiel + 2,0 m łupek ilasty	
pokład 404/5	
3,6 m piaskowiec + 0,4 m łupek ilasty + 0,5 m węgiel + 5,2 m łupek ilasty + 6,2 m piaskowiec + 1,2 m łupek ilasty	
pokład 405/1	
0,7 m łupek ilasty	
pokład 405/2	
14,8 m łupek ilasty miejscami piaszczysty + 7,0 m piaskowiec + 5,7 m łupek ilasty + 0,5 m węgiel + 11,95 m łupek piaszczysty + 0,65 m węgiel + 15,9 m łupek piaszczysty + 1,1 m węgiel + 5,7 m łupek piaszczysty + 2,5 m piaskowiec + 12,0 m łupek piaszczysty + 1,4 m węgiel + 2,2 m łupek ilasty + 1,0 m węgiel + 4,4 m łupek ilasty + 0,4 m węgiel + 1,0 m łupek piaszczysty	
15,1 m piaskowiec	
7,5 m łupek piaszczysty	
13,0 m piaskowiec	
pokład 414	
11,0 m piaskowiec	
4,0 m łupek piaszczysty + 1,1 m łupek ilasty + 2,9 m łupek ilasty miejscami zapiaszczony + 5,0 m piaskowiec	
pokład 418	
1,5 m łupek ilasty + 10,5 m łupek piaszczysty + 0,6 m węgiel + 0,4 m łupek ilasty + 0,4 m węgiel + 5,2 m łupek ilasty + 1,0 m węgiel + 2,1 m łupek ilasty + 6,9 m piaskowiec + 1,5 m łupek ilasty + 9,2 m łupek piaszczysty i ilasty	
pokład 501	
3,0 m łupek ilasty	
pokład 510	
7,5 m łupek piaszczysty + 10,1 m łupek ilasty + 4,2 m łupek piaszczysty + 8,5 m łupek ilasty	
10,7 m piaskowiec	



Rys. 2. Profil geologiczny w rejonie ściany 577a w pokładzie 510
 Fig. 2. Geological profile in the area of the longwall 577a in seam 510

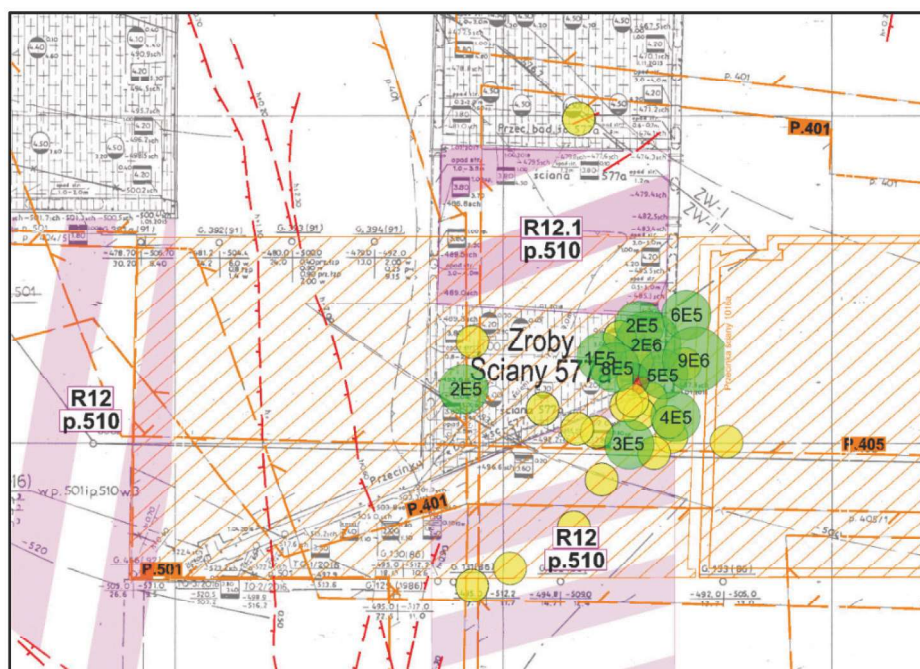
Tabela 1. Zestawienie aktywności sejsmicznej w czasie prowadzenia eksploatacji pokładu 501
Table 1. Seismic activity during mining of the coal seam 501

Ściana	Liczba wstrząsów					Suma wstrząsów ΣN	Suma energii $\Sigma E [10^6 J]$
	$10^2 J$	$10^3 J$	$10^4 J$	$10^5 J$	$10^6 J$		
65	1421	389	75	2	1	1888	7,21
62	1313	256	50	1	1	1621	3,90
16	219	362	57	0	0	638	2,42
1016a	844	855	97	0	0	1796	6,1
912a	1	10	2	0	0	13	0,18
911	15	19	2	0	0	36	0,08
37	3525	2227	863	54	3	6672	64
508	3298	2283	515	53	1	6150	44
509	1027	670	106	9	2	1814	13,0
509a	1428	1017	104	7	0	2556	8,7
S	13091	8088	1871	126	8	23184	149,59

Tabela 2. Zestawienie aktywności sejsmicznej w czasie prowadzenia eksploatacji pokładu 510 ścianami 576 i 577a
Table 2. Summary of seismic activity during mining of the coal seam 510 longwalls 576 and 577a

Ściana	Liczba wstrząsów					Suma wstrząsów ΣN	Suma energii $\Sigma E [10^6 J]$
	$10^2 J$	$10^3 J$	$10^4 J$	$10^5 J$	$10^6 J$		
576	84	61	11	0	0	156	0,58
577a*	22	60	28	8	2	120	15,0
S	106	121	39	8	2	176	15,58

*do czasu przeprojektowania



Rys. 3. Aktywność sejsmiczna (od $10^4 J$) rejestrowana w trakcie eksploatacji pokładu 510 ścianą 577a z naniesioną projekcją dokonanej eksploatacji w pokładzie 501

Fig. 3. Seismic activity (from $10^4 J$) recorded during mining of the coal seam 510 by longwall 577a with the projection of the exploitation carried out in the coal seam 501

W związku z powyższym kopalnia zleciła wykonanie opracowania naukowo-badawczego w zakresie „Weryfikacji sposobu i zakresu kontynuowania eksploatacji pokładu 510 w polu B1 w Polskiej Grupie Górniczej S.A. Oddział «Mysłowice –Wesoła»”. W przedmiotowym opracowaniu przedstawiono, między innymi, prawdopodobne przyczyny rejestrowanej aktywności sejsmicznej oraz lokalizację nowej przecinki ściany 577a.

2. Analiza mechanizmów ognisk wstrząsów

Najpełniejsze odwzorowanie rozkładu sił działających w ognisku wstrząsu uzyskuje się metodą inwersji tensora momentu sejsmicznego (TMS). Wartość przemieszczenia, przy uogólnieniu źródła wstrząsu do źródła punktowego, gdzie rozmiary ogniska są bardzo małe w porównaniu z długością fali sejsmicznej, jest wyrażona jako

iloczyn kombinacji par sił z momentami i bez momentów oraz własności górotworu (Aki, Richards 1980), co możemy zapisać jako:

$$u_k(x, t) = M_{ij} \frac{dG_{ki}}{dx_j} = M_{ij} * G_{ki,j} \quad (1)$$

gdzie:

- u_k – przemieszczenie,
- M_{ij} – tensor momentu sejsmicznego źródła,
- G_{ki} – funkcja Greena (funkcja opisująca odpowiedź impulsową ośrodka geologicznego na drodze przebytej przez falę sejsmiczną),
- $G_{ki,j}$ – pochodne funkcji Greena względem współrzędnej po przecinku w indeksie.

Jeżeli dodatkowo założymy, że wszystkie składowe tensora momentu sejsmicznego ulegają jednakowym zmianom w czasie, to pole przemieszczeń może być zapisane w sposób następujący:

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

gdzie:

$s(t)$ – funkcja źródła

Pochodne funkcji Green'a $G_{ki,j}$ odpowiadają fizycznie przemieszczeniom na k -tym stanowisku spowodowanym działaniem pary sił w ognisku wzdłuż osi i i o ramieniu pomiędzy nimi o kierunku osi j (Jost, Herman 1989). Natomiast tensor M_{ij} niesie informację o wzbudzonych w ognisku parach sił o kierunku i i ramieniu j . Zbiór wszystkich składowych tensora M_{ij} , odpowiadających dziewięciu kombinacjom i i j , można przedstawić jako macierz 9-elementową M :

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{32} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Trzy składowe diagonalne ($i=j$) opisują pary sił bez momentów i są skierowane odpowiednio wzdłuż osi układu współrzędnych. Pozostałe sześć składowych reprezentuje odpowiednio skierowane momenty sił.

Szczególne znaczenie dla wstrząsów górniczych ma rozkład TMS na 3 składowe:

$$M = M_1 + M_2 + M_3 \quad (4)$$

gdzie:

$$M_1 = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & a & 0 \\ 0 & 0 & a \end{bmatrix} \quad M_2 = \begin{bmatrix} 0 & b_3 & -b_2 \\ -b_3 & 0 & b_1 \\ b_2 & -b_1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$M_3 = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 \\ c_2 & c_4 & c_5 \\ c_3 & c_5 & -c_1 - c_4 \end{bmatrix}$$

Tensor składowy M_1 (diagonalny o wszystkich elementach diagonalnych jednakowych), nazywany również składową izotropową (ISO), fizycznie odpowiada ona zmianie objętości w źródle (ekspansji lub kontrakcji) równomiernie we wszystkich kierunkach. Tensor M_2 (całkowicie asymetryczny) zanika, ponieważ całkowita suma momentów w ognisku jest równa zero. Trzeci tensor (składowa dewiatorowa) M_3 (symetryczny o śladzie równym zero) odpowiada złożeniu dwóch układów sił: liniowego dipola skompensowanego (LDS) i podwójnej pary sił (PPS).

Analizę mechanizmów przeprowadzono metodą inwersji amplitud fali P w domenie czasu z uwzględnieniem kierun-

ków pierwszych wychyleń, do której wykorzystano zapisy zjawisk sejsmicznych zarejestrowanych przez kopalnianą sieć seismometryczną i aparatury systemu ARAMIS M/E (Misz 2019). Do obróbki danych sejsmicznych i wyznaczenia mechanizmów oraz parametrów spektralnych wykorzystano program *FOCI* (Kwiatek 2019). W wyniku obliczeń uzyskano procentowy udział składowych tensora momentu sejsmicznego (składowa izotropowa (ISO) opisująca zmianę objętości w ognisku wstrząsu (eksplozja „+” lub implozja „-”), jednoosiowe ściskanie „-” lub rozciąganie „+” (LDS), oraz składową ścinającą (PPS) opisaną przez podwójną parę sił), położenie płaszczyzn uskokowych (nodalnych), błąd estymacji momentu sejsmicznego oraz macierz kowariancji dla tensora (Stec, Błaszczuk 2008). Wyniki obliczeń dla rozwiązania pełnego tensora mechanizmu ognisk analizowanych wstrząsów sejsmicznych przedstawiono w tabeli 3.

Znaczny udział składowej eksplozyjnej i jednoosiowego ściskania bądź rozciągania jest charakterystyczną cechą wstrząsów indukowanych i świadczy o procesach nacisku warstw stropowych na niewyekspluatowane części pokładu (Misz 2019). Procentowy udział składowej ISO mieści się w granicach od 0,3% do 33,7%, natomiast procentowy udział składowej LDS mieści się w granicach od 6,3% do 66,9%. Procentowy udział składowej PPS mieści się w granicach od 0,8% do 93,5%. Kierunki płaszczyzn nodalnych pokrywają się z kierunkami ugięcia stropu, a dominujący udział składowej LDS potwierdza przyczynę rejestrowanej aktywności sejsmicznej związanej z rozładowaniem naprężeń skumulowanych w pozostawionym pasie calizny węglowej pomiędzy ścianami 16 i 1016a w pokładzie 501. Przedmiotowy pas calizny węglowej w wyniku nacisku uginających się kompleksów skał stropowych poddany został działaniu intensywnych sił ścisających, gdzie następnie po osiągnięciu pewnego poziomu naprężeń i gwałtownego ich rozładowania stawał się bezpośrednią przyczyną rejestrowanej aktywności sejsmicznej. Uproszczony schemat działania LDS opisującego tąpnięcie filara przedstawiono na rys. 4.

Na rys. 5 przedstawiono graficzne rozwiązania mechanizmów zarejestrowanych wstrząsów górniczych o energii $\geq 10^3$ J na tle mapy osiadania stropu nad pokładem 501 (widok 3D) zawartej w pracy (Makówka i in. 2018).

3. Analiza parametrów spektralnych

Program *FOCI* (Kwiatek 2019) umożliwia przeprowadzenie analizy spektralnej zarejestrowanego sygnału sejsmicznego, w wyniku której wyznaczane są tzw. parametry spektralne, za pomocą których możemy scharakteryzować ognisko wstrząsu, a należą do nich: moment sejsmiczny, magnituda momentu sejsmicznego, rozmiar ogniska, energia wyzwolona w postaci fal sejsmicznych, statyczny spadek naprężeń oraz naprężenie pozorne.

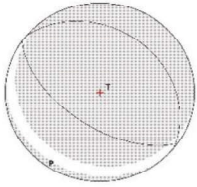
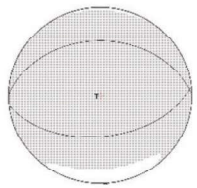
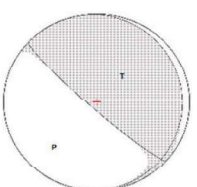
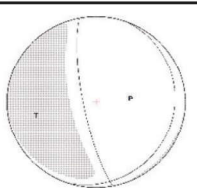
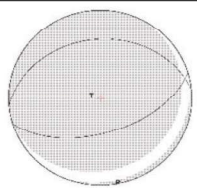
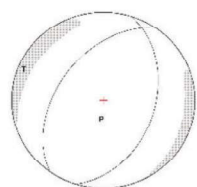
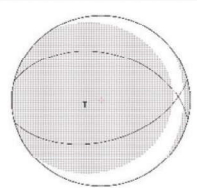
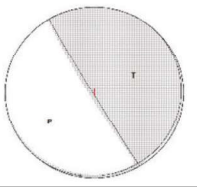
Moment sejsmiczny M_0 jest miarą wielkości wstrząsu opisany jako iloczyn modułu sztywności ośrodka w ognisku μ , średniego przemieszczenia u na płaszczyźnie rozrywu oraz powierzchni uskoku s (Aki, Richards 1980), co można zapisać:

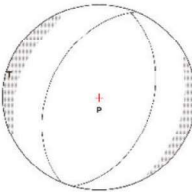
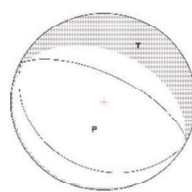
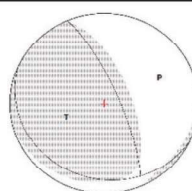
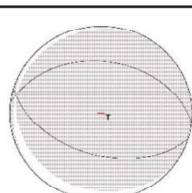
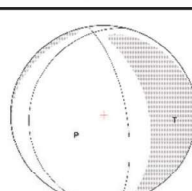
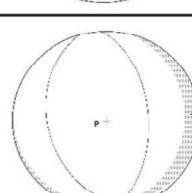
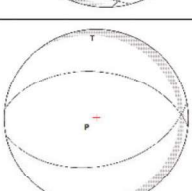
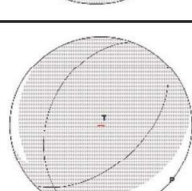
$$M_0 = \mu s \quad (5)$$

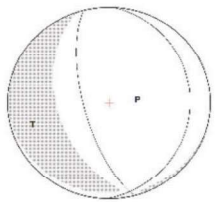
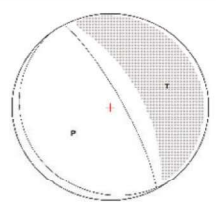
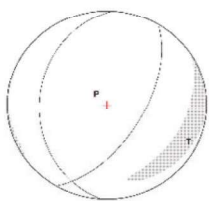
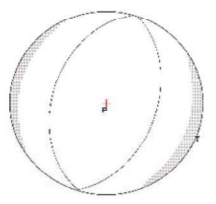
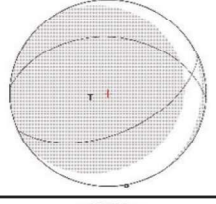
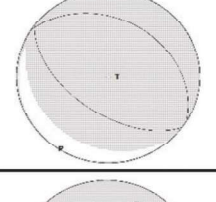
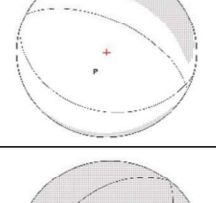
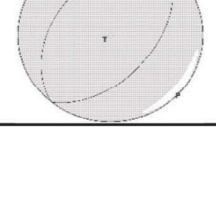
Moment sejsmiczny można przedstawić również w formie logarytmicznej po przeliczeniu go na magnitudę momentu M_{M_0} za pomocą wzoru (Hanks, Konamari 1979):

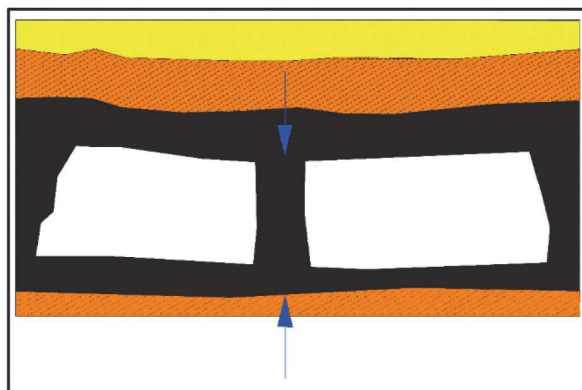
$$M_{M_0} = \left(\frac{2}{3}\right) \log M_0 - 6 \quad (6)$$

Tabela 3. Wyniki obliczeń mechanizmów ognisk analizowanych wstrząsów
 Table 3. Results of calculations of focal mechanisms of analyzed tremors

l.p.	Data czas	Energia 10^5 [J]	Płaszczyzny nodalne (rozciągłość ^o / azymut ^o / kąt poślizgu ^o)		Osie naprężeń (rozciągłość ^o / azymut ^o)		Graficzny model ogniska	Składowe tensora [%]		
			A	B	P	T		ISO	LDS	PPS
1	13.11.2017 13:54	3,0	124,7 59,3 87,8	309,1 3,8 93,8	216/14	28/76		32,6	66,9	0,5
2	16.11.2017 11:46	0,9	83,9 52,1 86,3	270 38,1 3	177/7	334/82		33,7	58	8,3
3	17.11.2017 16:57	0,8	132,2 83,8 83,8	357,2 8,8 134,7	228/38	35/51		0,3	-6,3	93,5
4	22.11.2017 15:19	4,0	169,2 78,3 -96,6	18,9 13,4 -60,9	71/56	265/33		-20,3	-35,6	44
5	23.11.2017 2:44	20,0	72,9 56,9 83,5	264,5 33,7 99,8	168/12	322/77		32,7	66,7	0,6
6	1.12.2017 0:21	5,0	215,4 48,3 -78,1	17,8 43 -103,1	190/81	297/3		-33	-56,4	10,6
7	7.12.2017 15:36	0,6	75,2 50,7 71,4	283,5 42,9 111,5	178/4	283/75		31,2	64,7	4,2
8	7.12.2017 22:36	0,9	149,5 88,6 86	40,4 4,3 160,8	243/43	55/46		7,4	14,1	78,5

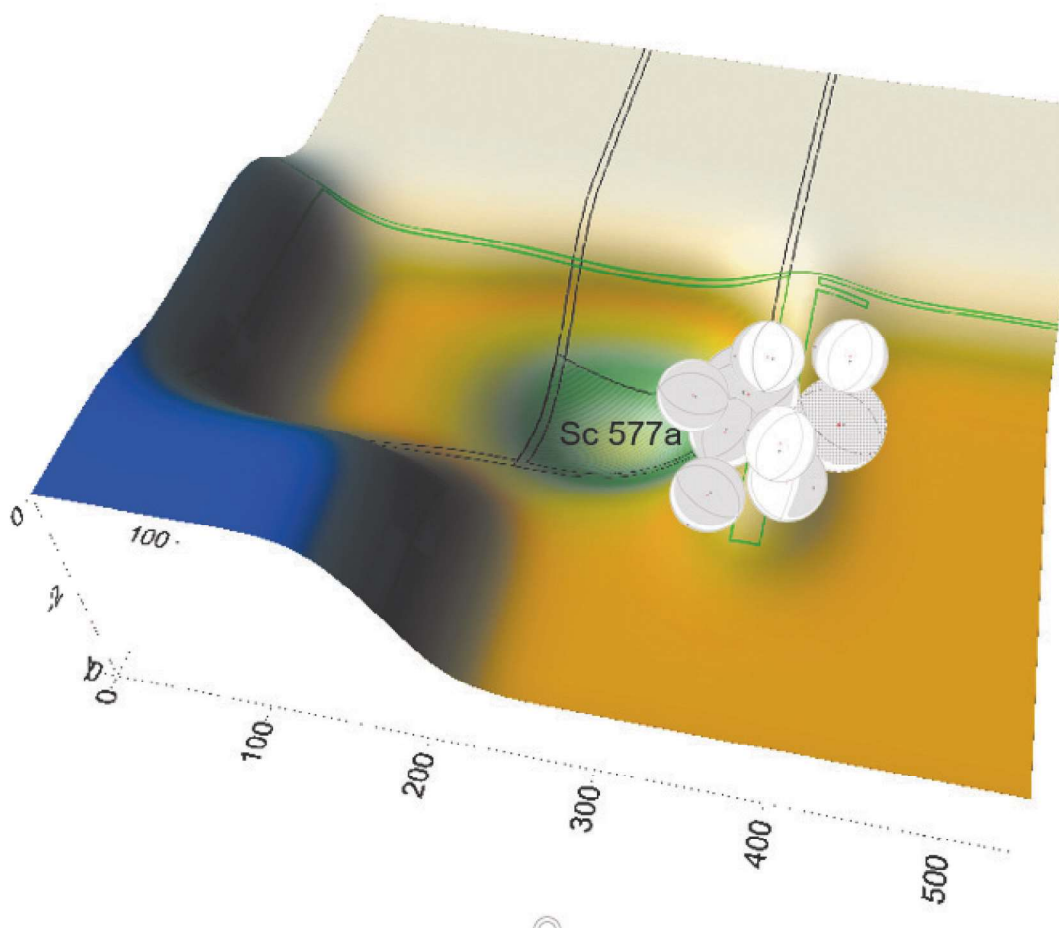
l.p.	Data czas	Energia 10^5 [J]	Płaszczyzny nodalne (rozciągłość° / azymut° / kąt poślizgu°)		Osie naprężeń (rozciągłość° / azymut°)		Graficzny model ogniska	Składowe tensora [%]		
			A	B	P	T		ISO	LDS	PPS
9	8.12.2017 13:04	6,0	203 46,3 -85,1	15,9 43,9 -95,1	180/86	290/1		-33,1	-53,1	13,8
10	9.12.2017 20:13	0,8	296,1 64,6 -91,1	118,7 25,4 -87,7	204/70	27/20		-27,4	-56,6	17,1
11	11.12.2017 11:23	0,9	337,1 76,9 101,6	114,8 17,5 49,1	57/31	262/57		17,5	39,2	43,3
12	11.12.2017 20:02	1,0	106,9 50,3 96,5	276,8 40,1 82,3	192/5	57/83		32,7	65,5	1,8
13	13.12.2017 1:41	0,2	350,3 70 -98,5	194 21,7 -67,8	246/64	87/24		-26,4	-53,3	22
14	13.12.2017 7:19	0,09	356,9 52,7 -82,1	164,1 38 -100,2	302/80	81/7		-32,4	-64,7	2,9
15	13.12.2017 8:29	0,08	275,8 46,1 -78,3	79,1 45,1 -101,9	264/82	357/0		-32,8	-66,1	1,1
16	13.12.2017 13:38	8,0	46,6 52,5 107,2	199,6 40,7 68,9	124/6	11/75		32,5	63,6	3,9

l.p.	Data czas	Energia 10^5 [J]	Płaszczyzny nodalne (rozciągłość° / azymut° / kąt poślizgu°)		Osie naprężeń (rozciągłość° / azymut°)		Graficzny model ogniska	Składowe tensora [%]		
			A	B	P	T		ISO	LDS	PPS
17	15.12.2017 21:21	0,3	165,5 69,7 -95,9	2,2 21,1 -74,3	66/65	260/24		-27,5	-54,5	18
18	16.12.2017 19:46	0,1	332 79,7 -88,6	144,2 10,4 -97,8	244/55	61/35		-23,4	-45,5	31,1
19	17.12.2017 1:47	0,05	30,7 60,2 -75,5	183,2 32,9 -113,6	334/71	110/14		-32,8	-62,5	4,7
20	17.12.2017 3:58	0,06	18,3 46,8 88,6	196,3 43,2 -91,5	317/88	107/2		-32,9	-59,4	7,7
21	17.12.2017 4:06	0,08	66,7 53,8 73,5	273,3 39,3 111,2	168/7	287/75		31,2	66,6	2,2
22	17.12.2017 9:04	90,0	126,4 55,7 92,4	302,1 34,1 86,4	215/11	46/79		32,5	64,6	3
23	17.12.2017 12:37	0,8	296,6 59,1 -84,3	105,5 31,4 -99,5	223/75	22/14		-29,9	-58,1	12
24	17.11.2017 14:46	2,0	39,2 50,7 90,3	21,7 39,3 89,7	129/6	311/84		33,7	64,4	2



Rys.4. Uproszczony schemat działania pionowego dipola odpowiadającego implozji

Fig. 4. Simplified scheme of vertical dipole corresponding to implosion



Rys. 5. Graficzne rozwiązania mechanizmów zarejestrowanych wstrząsów górniczych w rejonie ściany 577a o energii $\geq 10^5$ J na tle mapy osiadania stropu nad pokładem 501 (Makówka i in. 2018)

Fig. 5. Graphic solutions of mechanisms of registered mining tremors in the area of longwall 577a with energy $\geq 10^5$ J on the background of the map of the ceiling over the seam 501 (Makówka i in. 2018)

Energia sejsmiczna wstrząsu E_s to nic innego jak całkowita energia sprężysta wypromieniowana ze źródła, będąca sumą energii fal podłużnych i poprzecznych. Energię fali sejsmicznej można przedstawić następującym równaniem (Mendecki 1997):

$$E_s = 8\pi\rho V \int_0^\infty V^2(f) df \quad (7)$$

gdzie:

- ρ – gęstość ośrodka,
- V – prędkość fali sejsmicznej,
- f – częstotliwość drgań.

Promień dyslokacji (ogniska) jest wartością odwrotnie proporcjonalną do częstotliwości narożnej f i wprost proporcjonalną do prędkości fali sejsmicznej w ognisku v , z uwzględnieniem stałego współczynnika l zależnego od

modelu ogniska (Marcak, Zuberek 1994), co można zapisać:

$$R = \frac{v}{2\pi f} l \quad (8)$$

Z wartości momentu sejsmicznego i promienia ogniska można wyznaczyć średni spadek naprężeń. Parametr ten silnie zależy od przyjętego modelu źródła i przedstawia jednolitą redukcję naprężeń, powodującego poślizg na uskoku. Statyczny spadek naprężeń określa stopień odprężenia górotworu po wystąpieniu zjawiska sejsmicznego i wskazuje różnicę pomiędzy stanem naprężeń przed i po wstrząsie, uśrednioną do powierzchni uskoku (Brune 1970):

$$\Delta\sigma = \frac{7 Mo}{16R^3} \quad (9)$$

gdzie:

Mo – moment sejsmiczny,

R – rozmiar ogniska

Naprężenie pozorne Np , będące miarą rozładowania naprężeń, określone jest jako wartość energii E_s wyzwolonej w formie fal sejsmicznych na jednostkę powierzchni uskoku s i jednostkę przemieszczenia u (Gibowicz, Lasocki 1997), co możemy zapisać:

$$Np = \frac{E_s}{su} \quad (10)$$

Jest to parametr niezależny od modelu ogniska i może służyć jako wskaźnik do oceny metod rozładowywania naprężeń w ogniskach wstrząsów. Wyznaczone parametry spektralne analizowanych wstrząsów sejsmicznych przedstawiono w tabeli 4.

Podstawowym parametrem spektralnym opisującym model dyslokacji źródła sejsmicznego jest moment sejsmiczny. Zgodnie z przyjętymi kryteriami literaturowymi śledzenie zmian średniej wartości momentu sejsmicznego w określonych interwałach czasu może dostarczyć dodatkowych informacji o zmianach stanu zagrożenia tąpnięmi i wstrząsami (Misz 2019). Wartości momentów sejsmicznych uzyskanych w trakcie analizy spektralnej dla analizowanych wstrząsów wahają się w przedziale od $2,55 \cdot 10^{10}$ do $1,04 \cdot 10^{13}$ Nm.

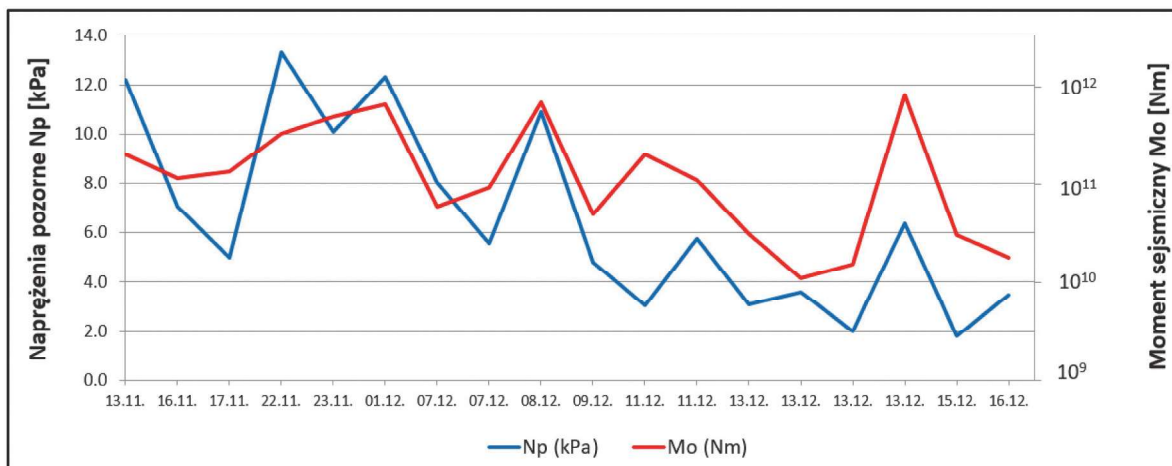
Parametrem dającym informacje odnośnie aktualnego stanu zagrożenia wstrząsami i tąpnięmi jest naprężenie pozorne. Jest dość uniwersalnym parametrem, gdyż jest praktycznie niezależne od modelu źródła sejsmicznego, niestety z reguły nie odwzorowuje rzeczywistego spadku naprężeń (Kwiatek 2009). Wartości naprężenia pozornego analizowanych wstrząsów wahają się w przedziale od 1,33 do 15,8 kPa. Przeprowadzona analiza wskazuje, że parametr ten, podobnie jak moment sejsmiczny, wykazuje zależności od rejestrowanego poziomu aktywności sejsmicznej. Wysokie wartości naprężenia pozornego wskazują na wysokie zagrożenie sejsmiczne, dlatego parametr ten z uwagi na duży rozrzut otrzymanych wartości może świadczyć o zmianach chwilowego stanu zagrożenia i może służyć jako wskaźnik do poprawy precyzyjnej predykcji tego zagrożenia (Misz 2019). Wykres zmian momentu sejsmicznego i naprężenia pozornego analizowanych wstrząsów przedstawiono na rys. 6.

Dodatkowo wysokie wartości naprężenia pozornego świadczą o zjawiskach sejsmicznych powstających w nienaruszonym ośrodku, natomiast niskie wskazują na zjawisko pęknięcia górotworu na istniejących strefach osła-

Tabela 4. Parametry spektralne analizowanych wstrząsów sejsmicznych

Table 4. Spectral parameters of analyzed tremors

Nr	Data	Godzina	Energia sejsmiczna E 10^5 [J]	Moment sejsmiczny Mo 10^{11} [Nm]	Promień ogniska R [m]	Spadek naprężeń Sn [MPa]	Naprężenia pozorne Np [kPa]	Energia spektralna E_s 10^5 [J]
1	13.11.2017	13:54	3,0	6,13	96,1	0,478	12,2	5,37
2	16.11.2017	11:46	0,9	3,49	85	0,338	7,1	1,51
3	17.11.2017	16:57	0,8	4,05	98,5	0,229	5,0	1,13
4	22.11.2017	15:19	4,0	9,89	77,5	0,746	13,3	5,46
5	23.11.2017	02:44	20,0	14,7	136,9	0,433	10,1	7,59
6	01.12.2017	00:21	5,0	19,9	129,4	0,566	12,3	14,1
7	07.12.2017	15:36	0,6	1,81	60,7	0,280	8,0	1,06
8	07.12.2017	22:36	0,9	2,78	76,7	0,293	5,58	0,79
9	08.12.2017	13:04	6,0	20,7	125,9	0,52	10,9	12,2
10	09.12.2017	20:13	0,8	1,51	85	0,193	4,80	0,44
11	11.12.2017	11:23	0,9	6,15	118,5	0,168	3,04	1,15
12	11.12.2017	20:02	1,0	3,33	85	0,279	5,74	1,36
13	13.12.2017	01:41	0,2	0,94	67,6	0,155	3,09	0,23
14	13.12.2017	07:19	0,09	0,33	56,8	0,135	3,58	0,058
15	13.12.2017	08:29	0,08	0,46	56,9	0,109	1,99	0,051
16	13.12.2017	13:38	8,0	24,7	159,2	0,336	6,36	8,94
17	15.12.2017	21:21	0,3	0,91	74	0,100	1,83	0,09
18	16.12.2017	19:46	0,1	0,54	54,9	0,145	3,44	1,45
19	17.12.2017	01:47	0,05	0,31	63,0	0,065	1,40	0,023
20	17.12.2017	03:58	0,06	0,25	65,8	0,04	1,33	0,025
21	17.12.2017	04:06	0,08	0,46	59,8	0,10	2,53	0,084
22	17.12.2017	09:04	90,0	104,0	202,4	0,536	15,80	93,7
23	17.12.2017	12:37	0,8	0,39	56,5	0,372	11,50	0,29
24	17.12.2017	14:46	2,0	0,89	55,4	0,372	7,71	0,38



Rys. 6. Zmiany momentu sejsmicznego (kolor czerwony) oraz zmiany wartości naprężenia pozornego (kolor niebieski) analizowanych wstrząsów zarejestrowanych w okresie od 13.11. do 16.12.2017.
 Fig. 6. Changes in seismic moment (red) and changes in apparent stress (blue) of the shocks analyzed during the period from 13.12. until 16.12.2017.

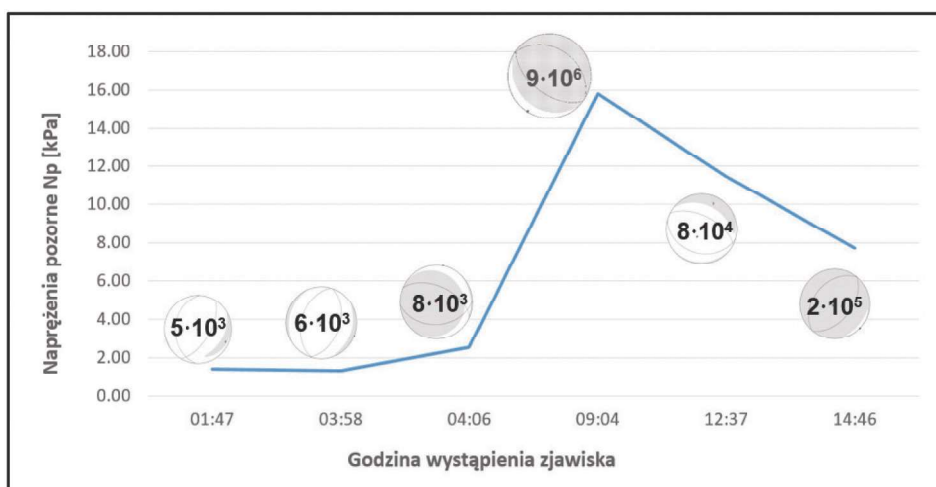
bienia (Kwiatk 2009) – tu na pozostawionym pasie calizny węglowej w pokładzie 501. Analizując powyższy wykres, w początkowym okresie prowadzenia ściany, obserwujemy wyższe wartości naprężeń pozornych świadczące o aktywności sejsmicznej, wynikającej prawdopodobnie z oddziaływania przemieszczającego się frontu ścianowego na kompleksy skał stropowych. Natomiast w miarę postępu frontu ścianowego obserwujemy malejącą tendencję wartości naprężeń pozornych, co może potwierdzać bezpośredni wpływ ww. pasa calizny na wzrost aktywności sejsmicznej w rejonie ściany 577a.

Zależność naprężenia pozornego od rejestrowanej aktywności sejsmicznej, a tym samym zagrożenia tapaniami i wstrząsami, może być wykorzystana również do krótkoterminowej oceny tego zagrożenia. Na rys. 7 przedstawiono wykres zmian wartości naprężenia pozornego dla wstrząsów zarejestrowanych w dniu 17.12.2017 r. Wstrząsy o energiach rzędu 10³ J wystąpiły na nocnej zmianie wydobyczej, natomiast późniejsze wstrząsy, po okresie kumulacji naprężeń i po gwałtownym ich rozładowaniu, na zmianie niewydobywczej. Występująca po sobie sekwencja wstrząsów charakteryzowała się wzrastającymi wartościami naprężenia

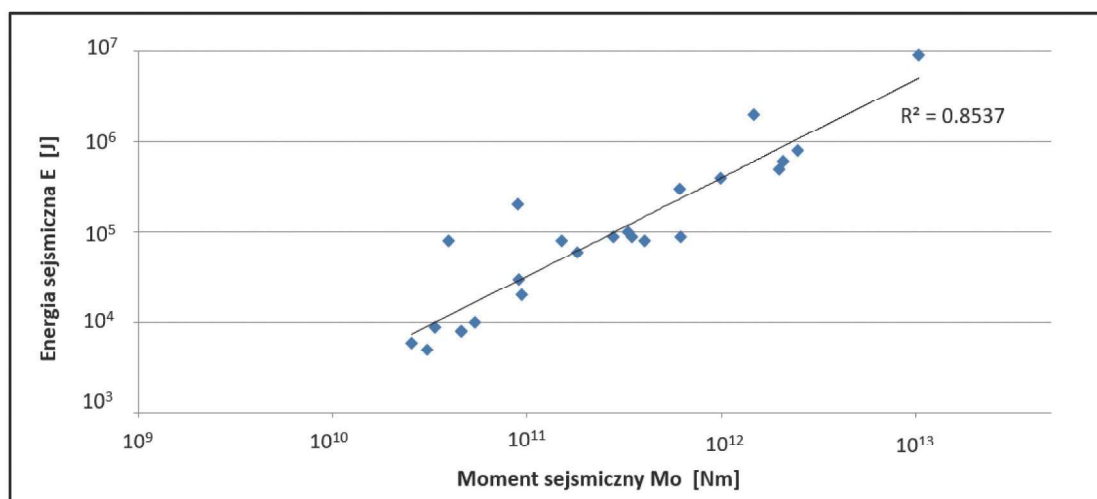
pozornego, co może być traktowane jako wskaźnik chwilowej zmiany wzrostu zagrożenia tapaniami i co finalnie doprowadziło do wystąpienia odprężenia w rejonie ściany 577a (skutek wstrząsu o energii 9 · 10⁶J).

Uwzględniając fakt, iż zmiany wartości naprężenia pozornego, podobnie jak momentu sejsmicznego ściśle korelują z obserwowanym poziomem aktywności sejsmicznej, a tym samym zagrożeniem tapaniami i wstrząsami, na rys. 8 przedstawiono wykres zależności momentu sejsmicznego i energii sejsmicznej analizowanych wstrząsów, natomiast na rys. 10 przedstawiono wykres zależności energii sejsmicznej i naprężenia pozornego.

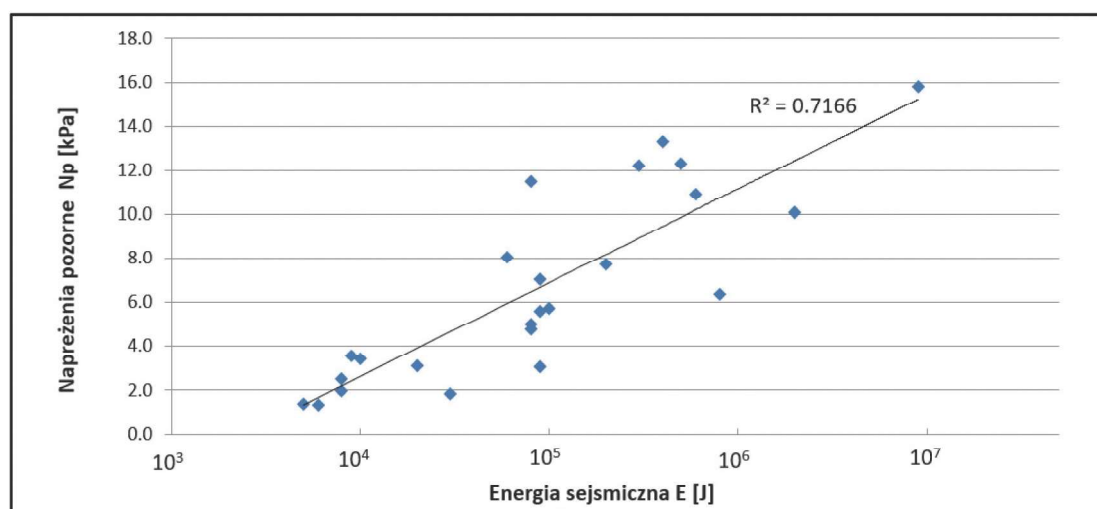
Na powyższych rysunkach widać wprost proporcjonalną zależność pomiędzy zestawionymi parametrami. Z uwagi na powyższe nasuwa się stwierdzenie, że skoro określone wartości energii sejsmicznej i momentu sejsmicznego są traktowane jako kryteria oceny zagrożenia tapaniami, to naprężenia pozorne z uwagi na przedstawione zależności również mogą posłużyć jako narzędzie w ocenie tego zagrożenia.



Rys. 7. Zmiany wartości naprężenia pozornego wstrząsów zarejestrowanych w dniu 17.12.2017 r. w rejonie ściany 577a
 Fig. 7. Changes in the value of apparent stress shocks registered on 17.12.2017r. in the area of longwall 577a



Rys. 8. Zależności momentu sejsmicznego i energii całkowitej analizowanych wstrząsów
 Fig. 8. Relationship of seismic moment and total energy of the analyzed shocks



Rys. 9. Zależności energii całkowitej i naprężenia pozornego analizowanych wstrząsów
 Fig. 9. Relationship of total energy and apparent stress of the analyzed shocks

4. Podsumowanie

Rejestrowany stan zagrożenia tąpnięciami i wstrząsami w trakcie eksploatacji pokładu 510 ścianą 577a w głównej mierze zdeterminowany był wpływem dokonanej eksploatacji wyżej zalegającego pokładu 501, tj. pozostawieniem niewybranej części pokładu w postaci pasa calizny węglowej po przeprojektowaniu ściany 16 i uruchomieniu ściany 1016a.

Przedstawione w artykule przykłady wykazują, iż tensor momentu sejsmicznego wstrząsów górniczych, jak również związane z nim parametry spektralne wykazują zależność od rejestrowanego stanu zagrożenia sejsmicznego. Wyznaczone mechanizmy ognisk wstrząsów w dość jednoznaczny sposób tłumaczą genezę powstawania zjawisk sejsmicznych w rejonie ściany, a zmiany wartości naprężenia pozornego w zależności od rejestrowanego poziomu aktywności sejsmicznej, a tym samym zagrożenia tąpnięciami i wstrząsami, mogą być wykorzystane do stworzenia kryteriów oceny tego zagrożenia. Dodatkowo, uwzględniając fakt, iż wysokie wartości naprężenia pozornego świadczą o zjawiskach sejsmicznych powstających w nienaruszonym ośrodku, natomiast niskie wskazują na istniejące strefy osłabienia, parametr ten może

służyć jako wskaźnik do oceny sposobów rozładowywania naprężeń w ogniskach wstrząsów.

Warto zauważyć, że metoda wyznaczania TMS, jak również określanie parametrów spektralnych ognisk wstrząsów są procedurami powszechnie znanymi w sejsmologii górniczej i globalnej. Pozostaje tylko określenie odpowiednich kryteriów oceny zagrożenia sejsmicznego i tąpnięciami opartej na śledzeniu zmian parametrów mechanizmu ognisk wstrząsów oraz ich parametrów spektralnych w celu poprawy efektywności metody sejsmologicznej.

Literatura

- AKI K. I RICHARDS P.G. 1980 - Quantitative Seismology - Theory and Methods. W.H. Freeman & Co. Vol. 1, 2, San Francisco.
- BRUNE J.N. 1970 - Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. Journal of Geophysical Research 75.
- GIBOWICZ S., LASOCKI S. 1997 - Rockbursts and seismicity in mines. Rotterdam
- HANKS T.C., KONAMARI H. 1979 - A moment magnitude scale. Journal of Geophysical Research 84.

- JOST M.L., HERMAN R.B. 1989 - A Student's Guide to and Review of Moment Tensor. Seismological Research Letters, vol. 60, St. Louis
- KWIATEK G. 2009 - Parametry ogniska sejsmicznego - materiały warsztatowe. (<http://private.igf.edu.pl/~debski/Warsztaty-Polkowice/problematyka/index.html>)
- KWIATEK G. 2019 - FOCI (<https://www.induced.pl/foci> - strona internetowa programu).
- MAKÓWKA J., KABIESZ J., DRZEWIECKI J., MYSZKOWSKI J., FREJOWSKI A. 2018 - Weryfikacja sposobu i zakresu kontynuowania eksploatacji pokładu 510 w polu B1 w Polskiej Grupie Górniczej S.A. Oddział „Mysłowice –Wesoła”. Katowice. Praca naukowa.
- MARCAK H., ZUBEREK W. 1994 - Geofizyka górnicza. Śląskie Wyd. Techniczne; Katowice.
- MENDECKI A. 1997 - Seismic Monitoring in Mines. Chapman & Hall.
- MISZ K. 2019 - Mechanizmy ognisk wstrząsów górniczych rejestrowanych w czasie eksploatacji pokładu 416 ścianą 413 w PGG S.A. Oddział KWK Mysłowice-Wesoła. „Przeгляд Górnicy” nr 4.
- STEC K. 2007 - Aktywność sejsmiczna Górnośląskiego Zagłębia Węglowego - 30 lat ciągłej obserwacji przez Górnośląską Regionalną Sieć Sejsmologiczną. „Przeгляд Górnicy” nr 7-8.
- STEC K., BŁASZCZYK 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.
- Artykuł wpłynął do redakcji – listopad 2019
Artykuł akceptowano do druku – 25.01.2020