



Mechanizmy ognisk wstrząsów górniczych rejestrowanych w czasie eksploatacji pokładu 416 ścianą 413 w PGG S.A. Oddział KWK Mysłowice-Wesoła

Tremors source mechanism generated during mining of the coal seam no. 416 with wall no. 413 at PGG S.A. KWK Mysłowice-Wesoła

Mgr inż. Krzysztof Misz*)

Treść: Zagrożenie tapaniami i wstrząsami z uwagi na konieczność systematycznego zwiększania głębokości prowadzonych robót górniczych staje się dominującym zagrożeniem towarzyszącym eksploatacji węgla kamiennego w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym. Wieloletnie obserwacje hazardu sejsmicznego wskazują, że na wielkość tego zagrożenia decydujący wpływ mają zaszczości eksploatacyjne oraz budowa geologiczna. W wyniku prowadzonych robót górniczych może dochodzić do okresowych zmian układu naprężeń i rozwoju procesów dynamicznych, co znajduje swoje odzwierciedlenie w rejestrowanej indukowanej aktywności sejsmicznej. W artykule przedstawiono kształtowanie się stanu zagrożenia tapaniami w czasie eksploatacji pokładu 416 w partii A zachód w PGG S.A. Oddział KWK Mysłowice-Wesoła oraz przedstawiono możliwe przyczyny wzmożonej aktywności sejsmicznej towarzyszącej eksploatacji pokładu 416 ścianą 413.

Abstract: The threat of rock bursts and shocks due to the need to systematically increase the depth of mining works is becoming dominant to hard coal mining in the Upper Silesian Coal Basin. Long-term observations of the seismic hazard indicate that the magnitude of this hazard is influenced by completed exploitation and geological structure. As a result of mining work, periodic changes in the stress system and the development of dynamic processes may occur, which is reflected in the registered induced seismic activity. This paper presents the development of the rock burst hazard during exploitation of the seam no. 416 in lot A west in the PGG S.A. Branch of KWK Mysłowice-Wesoła and possible causes of increased seismic activity accompanying the operation of the seam no. 416 with the wall no. 413.

Słowa kluczowe:

aktywność sejsmiczna, mechanizm ognisk, parametry spektralne

Keywords:

seismic activity, focal mechanism, spectral parameters

1. Wprowadzenie

Podziemna eksploatacja górnicza skutkuje naruszeniem równowagi górotworu, prowadząc do powstawania nowego układu sił, w którym obok obszarów odprężonych prowadzoną eksploatacją występują również strefy wzmożonych naprężeń. W wyniku kumulacji naprężeń dochodzi do rozwoju procesów dynamicznych skutkujących powstawaniem wstrząsów indukowanych. Wieloletnie obserwacje i analizy zjawisk sejsmicznych dowodzą, że warunki geologiczno-górnice (tektonika, zaszczości eksploatacyjne) oraz sposób prowadzenia eksploatacji są głównymi czynnikami wpływającym na mechanizm wstrząsów. Aktualnie najpełniejszy opis sił występujących w ognisku wstrząsu z uwzględnieniem uogólnionego modelu geologicznego uzyskuje się metodą inwersji tensora momentu sejsmicznego, który wyznaczany jest w oparciu o kierunki wychyleń (+/-) pierwszych wystąpień fali podłużnej P na sejsmogramach. W artykule podjęto próbę wyznaczenia mechanizmów wybranych wstrząsów sejsmicznych zarejestrowanych w czasie eksploatacji pokładu 416 ścianą 413 w PGG S.A. KWK Mysłowice-Wesoła. Analizie poddano 54 zjawiska sejsmiczne, dla których wyznaczono parametry spektralne oraz parametry źródła.

2. Warunki geologiczno-górnice i dokonana eksploatacja w partii A zachód

Partia A zlokalizowana jest w polu macierzystym, w południowej części obszaru górniczego Oddziału KWK Mysłowice-Wesoła. Granice partii stanowią:

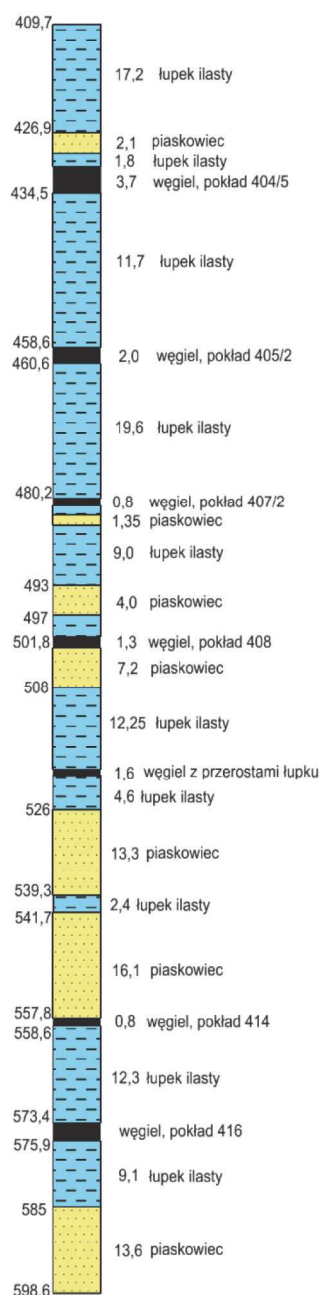
- od północy uskok „Międzyzszybowy” o zrzucie $10 \div 38$ m, uskok o zrzucie $10 \div 20$ m oraz uskok „Luiza” o zrzucie $20 \div 70$ m,
- od wschodu uskok „Ławecki” o zrzucie $80 \div 180$ m,
- od południa uskok „Książęcy” o zrzucie do 420 m,
- od zachodu uskok „Jakub” o zrzucie $40 \div 70$ m.

W partii tej warstwy zapadają w kierunku południowo-zachodnim pod kątem około 6° . Wyrobiska kamienne wykonane południkowo w środkowej części partii A dzielą tą partię na część wschodnią i zachodnią. W części zachodniej partii A reprezentantem warstw rudzkich dolnych (Górnośląska Seria Piaskowcowa) jest pokład 416 występujący generalnie na całym obszarze, w którym jego miąższość zmienia się od 2,8 m do 3,4 m.

Poniżej występują warstwy siodłowe reprezentowane przez pokład 501 występujący prawie na całym obszarze, o miąższości od 2,6 m do 5,7 m oraz pokład 510 występujący na całym obszarze, o miąższości od 9,0 m do 15,7 m. Pakiet skał stropowych nad i pod pokładem 416 przedstawiony został na rysunku 1.

*) PGG S.A. Oddział KWK Mysłowice-Wesoła.

G.25 (1961)



Rys. 1. Profil geologiczny w rejonie ściany 413 w pokładzie 416
Fig. 1. Geological profile in the area of the wall no. 413 in seam no. 416

W partii A zachód do chwili obecnej prowadzona była eksploatacja:

- pokładu 401, w latach 1973–1977, systemem podłużnym z zawałem stropu na całą miąższość pokładu tj. od 1,4 do 1,8 m,

Tabela 1. Aktywność sejsmiczna towarzysząca eksploatacji pokładu 501

Table 1. Seismic activity during mining of the coal seam no. 501

Ściana	N						Σ N	Σ E [J]	Σ E / Σ N [J]
	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷			
514	1040	586	31	1	0	0	1658	3,8 · 10 ⁶	2,29 · 10 ³
510	62	52	3	0	0	0	117	0,3 · 10 ⁶	2,56 · 10 ³
511	620	551	80	4	0	0	1255	5,8 · 10 ⁶	4,62 · 10 ³

- pokładu 404/1, w latach 1974–1978, systemem poprzecznym i podłużnym z zawałem stropu na całą miąższość pokładu, tj. od 2,2 do 2,85 m,
- pokładu 404/5, w latach 1978–1983, systemem poprzecznym z zawałem stropu na całą miąższość pokładu, tj. od 1,95 do 3,35 m,
- pokładu 405/2, w latach 1981–1988, systemem poprzecznym z zawałem stropu na całą miąższość pokładu, tj. od 2,4 do 3,3 m,
- pokładu 416, od roku 2014 do chwili obecnej, systemem poprzecznym z zawałem stropu na całą miąższość pokładu, tj. od 2,4 do 3,4 m,
- pokładu 501, od 2012 roku do chwili obecnej, systemem poprzecznym z zawałem stropu na wysokość do 3,8 m.

3. Aktywność sejsmiczna w rejonie ściany 413

W trakcie prowadzenia eksploatacji w partii A zachód zasadniczo rejestrowano niską aktywność sejsmiczną. W okresie eksploatacji pokładu 501 zarejestrowano łącznie 3030 wstrząsów sejsmicznych o sumarycznej energii $9,9 \cdot 10^6$ J, co zostało przedstawione w tabeli 1. W czasie eksploatacji pokładu 416 ścianami 415, 414 i 410 zarejestrowano łącznie 963 wstrząsy sejsmiczne o sumarycznej energii $1,0 \cdot 10^7$ J. Większą aktywność sejsmiczną, w tym występowanie wstrząsów górotworu o energiach rzędu 10^6 J i 10^7 J, rejestrowano w czasie prowadzenia ściany 413. Kształtowanie się aktywności sejsmicznej w okresie prowadzenia eksploatacji pokładu 416 ilustruje tabela 2 oraz rysunek 2.

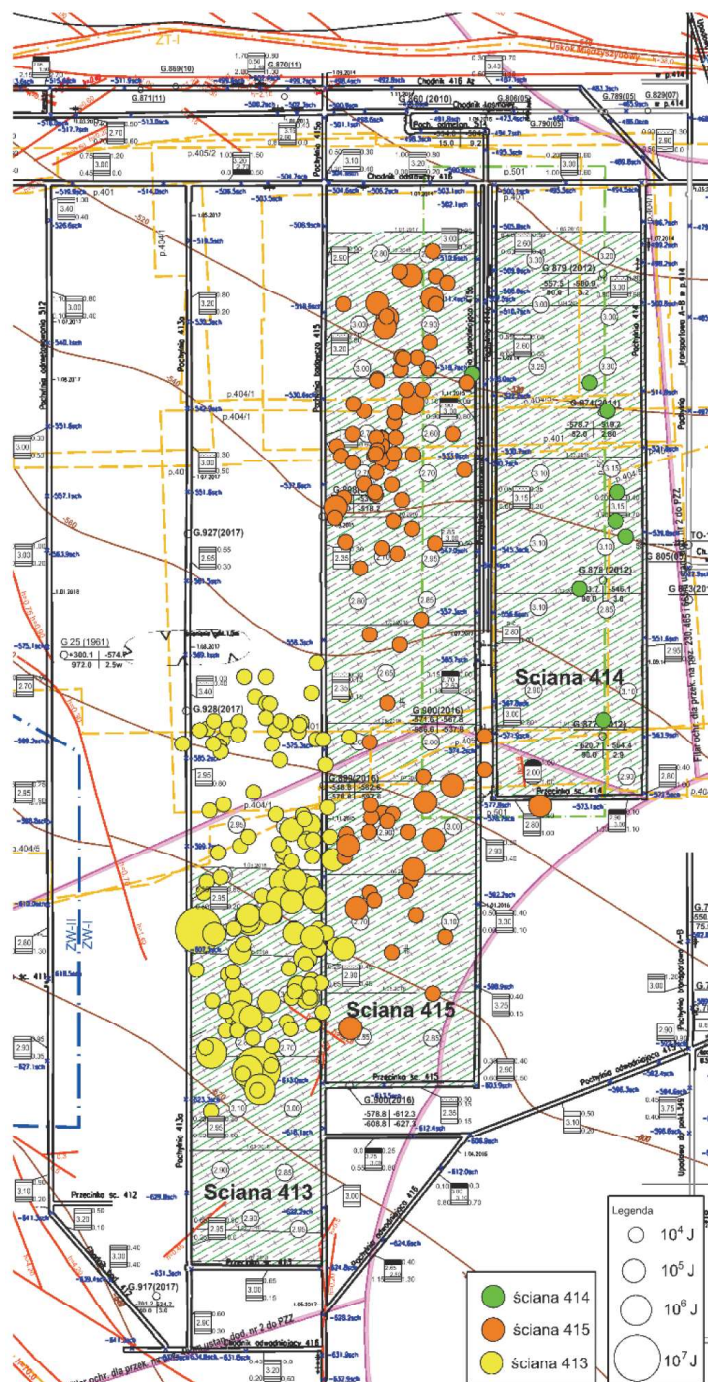
Z powyższego zestawienia wynika, że dotychczasowej eksploatacji pokładu 416 w partii A zachód w PGG S.A. Oddział KWK Mysłowice-Wesoła ścianami 415, 414 i 410 towarzyszyła niska aktywność sejsmiczna. Znaczny wzrost wysokoenergetycznej aktywności sejsmicznej nastąpił w czasie prowadzenia ściany 413, w momencie zbliżania się jej frontu do zrobów zawałowych ściany 415. Wzrost aktywności sejsmicznej związany jest przede wszystkim ze zjawiskiem ugięcia kompleksu skał stropowych zalegających nad pokładem 416 w wyniku powiększającej się przestrzeni zrobowej wyeksploatowanej ściany 415. Na tym etapie eksploatacji rejestrowano wstrząsy sejsmiczne o energiach rzędu 10^6 J i 10^7 J, nieprzewidzianych w prognozie aktywności sejsmicznej sporządzonej dla partii A zachód. Doświadczenia polskiego górnictwa węglowego niejednokrotnie wskazują przyczynę wysokoenergetycznej aktywności jako efekt uaktywnienia się monolitycznej warstwy (lub kompleksu warstw) piaskowców lub łupków piaszczystych o odpowiednio dużych miąższościach i wytrzymałościach (Zorychta, 2018). Za słuszością powyższego stwierdzenia przemawia również brak skutków w wyrobiskach ściany 413, co dowodzi, iż hipocentrum rejestrowanych wstrząsów występowało w znacznych odległościach od pokładu 416.

Coraz częściej do oceny zagrożenia sejsmicznego w kopalniach stosuje się techniki bezinwazyjnego obrazowania górotworu metodą tomografii pasywnej. Do stworzenia

Tabela 2. Aktywność sejsmiczna towarzysząca eksploatacji pokładu 416
 Table 2. Seismic activity during mining of the coal seam no. 416

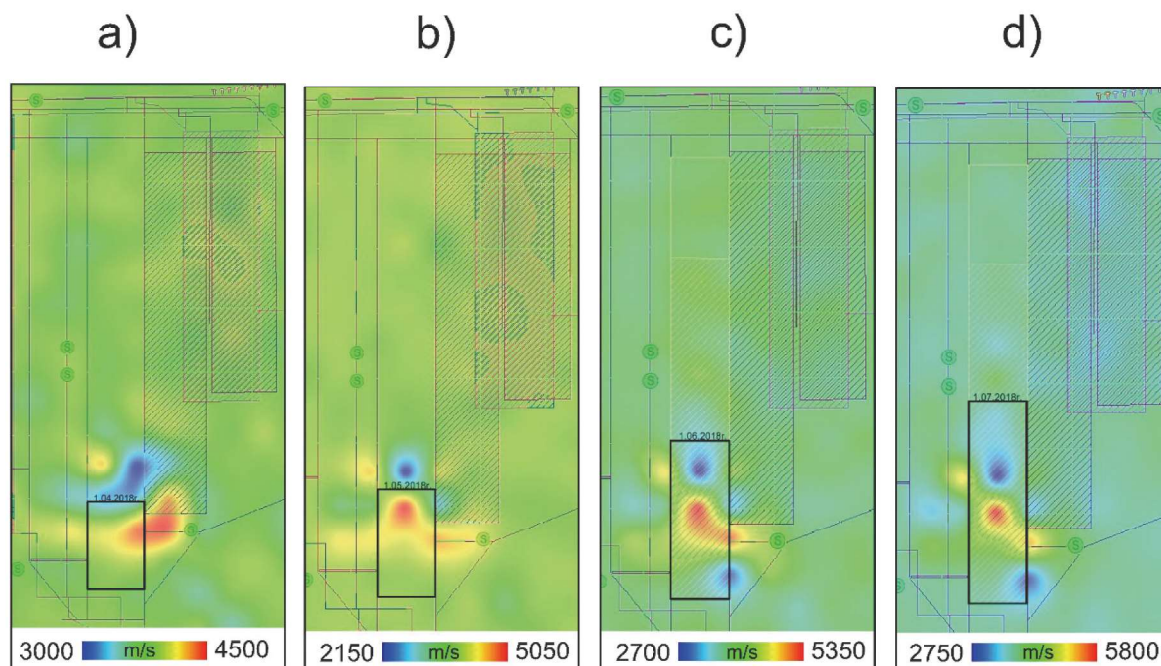
Ściana	N						Σ N	Σ E [J]	Σ E / Σ N [J]
	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷			
414	41	219	8	0	0	0	268	0,8 · 10 ⁶	2,98 · 10 ³
410	18	13	0	0	0	0	72	0,05 · 10 ⁶	0,69 · 10 ³
415	294	233	81	15	0	0	623	9,1 · 10 ⁶	14,3 · 10 ³
413*	280	306	101	23	6	2	718	87,0 · 10 ⁶	121,2 · 10 ⁶

*Do 31.10.2018 r.



Rys. 2. Mapa pokładu 416 w partii A zachód z lokalizacją ognisk wstrząsów o energii sejsmicznej od 1·10⁴J

Fig. 2. Map of the coal seam no. 416 in lot A west with location of tremors with seismic energy from 1 · 10⁴J



Rys. 3. Przestrzenny rozkład anomalii prędkości fal sejsmicznych w oknie czasowym 1 miesiąca: a) do 31.03, b) do 30.04, c) do 31.05, d) do 30.06

Fig. 3. Spatial distribution of the anomaly of the speed of seismic waves in a 1 month window: a) to 31/03, b) to 30/04, c) to 31/05, d) to 30/06

obrazu tomograficznego wykorzystywane są czasy wejść fali podłużnej P , a parametrem badanym jest prędkość propagacji fali i jej związek z rozkładem prędkości. Wykorzystanie map tomograficznych badanego obszaru polega zazwyczaj na porównaniu obrazów pola prędkości w zmieniających się oknach czasowych. Takie rozwiązanie umożliwia śledzenie procesu przemieszczania się obszarów potencjalnie zagrożonych zjawiskami sejsmicznymi (Dębski, 2012). Na rysunku 3 przedstawiono przestrzenny rozkład anomalii prędkości fal sejsmicznych w oknie czasowym 1 miesiąca w okresie marzec - czerwiec 2018.

Przedstawione powyżej modele prędkościowe tomografii pasywnej wskazują, iż pomimo postępującego frontu ścianowego, a tym samym powiększającej się powierzchni zrobów, najwyższe wartości prędkości fali sejsmicznej niezmiennie występują w rejonie miejsca styku zrobów ściany 413 i 415. Otrzymane mapy tomograficzne oraz mapy rejestrowanej aktywności sejsmicznej wskazują, iż dojeżdżanie frontem ściany do zrobów sąsiedniej ściany skutkuje powstaniem strefy wzmożonych naprężeń objawiających się powstaniem dodatniej anomalii prędkości fali sejsmicznej (wzrost zagrożenia sejsmicznego) oraz wzmożoną aktywnością sejsmiczną.

4. Analiza mechanizmów ognisk wstrząsów i parametrów spektralnych

Wieloletnie obserwacje i analizy zjawisk sejsmicznych generowanych działalnością człowieka dowodzą, iż mechanizmy powstawania sejsmiczności indukowanej, z uwagi na obecności innych niż tylko ścinających składowych, zasadniczo różnią się od mechanizmów naturalnych trzęsień ziemi. Można wyróżnić dwa podstawowe rodzaje wstrząsów pochodzenia górniczego: wstrząsy bezpośrednio związane z pracami górniczymi oraz wstrząsy związane z przemieszczeniami na występujących nieciągłościach geologicznych. Aktualnie najpełniejsze odwzorowanie rozkładu sił powsta-

jących w ognisku wstrząsu uzyskuje się metodą inwersji tensora momentu sejsmicznego. Fundamentalnym założeniem metody jest uogólnienie źródła wstrząsu powodującego przemieszczenia do źródła punktowego, gdzie rozmiary ogniska są bardzo małe w porównaniu z długością fali sejsmicznej. Przy takim uproszczeniu możemy założyć, że wartość przemieszczenia jest wyrażona jako iloczyn kombinacji par sił z momentami i bez momentów oraz własności górotworu, co możemy zapisać jako:

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

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:

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

gdzie:

- $s(t)$ – funkcja źródła

Pochodne funkcji Greena G_{ki} 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 informacje 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-elementowa M :

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

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.

Tensor M_{ij} można rozkładać na wiele sposobów jednak jeden ma szczególnie znaczenie dla wstrząsów górniczych:

$$M = M_1 + M_2 + M_3$$

$$\text{gdzie: } M_1 = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & a & 0 \\ 0 & 0 & a \end{bmatrix}$$

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

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

Tensor składowy M_1 (diagonalny o wszystkich elementach diagonalnych jednakowych), nazywany również składową izotropową, fizycznie odpowiada zmianie objętości w źródle (ekspansji lub kontrakcji) równomiernie we wszystkich kierunkach. Tensor M_2 (całkowicie antysymetryczny) zanika, ponieważ całkowita suma momentów w ognisku byłaby różna od zera. 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 kierunków pierwszych wychyleń, do której wykorzystano zapisy zjawisk sejsmicznych zarejestrowanych przez zoptymalizowaną kopalnianą sieć sejsmometryczną przy użyciu aparatury systemu ARAMIS M/E. Do obróbki danych sejsmicznych i wyznaczania mechanizmów oraz parametrów spektralnych wykorzystano program *FOCI* (Kwiatkiewicz, 2018). W wyniku obliczeń uzyskano procentowy udział składowych tensora momentu sejsmicznego (składowa izotropowa *ISO*) opisującą zmianę objętości w ognisku wstrząsu (eksplozja „+” lub implozja „-”), jednoosiowe ściskanie „-” lub rozciąganie „+” (*LDS*), oraz składową ścinającą (*PPS*) opisaną przez podwójną parę sił, położenie płaszczyzn uskoku (nodalnych), błąd estymacji momentu sejsmicznego oraz macierz kowariancji dla tensora (Stec, Błaszczak, 2008).

Program, poprzez wbudowane moduły, daje możliwość przeprowadzenia analizy spektralnej zarejestrowanego sygnału, w wyniku której otrzymuje się szereg parametrów pozwalających zdefiniować zjawiska zachodzące w ognisku, 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 , nazywany też skalarnym momentem sejsmicznym, jest miarą wielkości wstrząsu, wyróżnioną przez czynniki opisujące model dyslokacji źródła sejsmicznego. Jest to iloczyn modułu sztywności ośrodka μ , średniego przemieszczenia u oraz powierzchni uskoku s , co można zapisać:

$$M_0 = \mu * u * s$$

Moment sejsmiczny można przedstawić również w formie logarytmicznej po przeliczeniu go na magnitudę momentu M_{Mo} za pomocą wzoru:

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

Energia sejsmiczna wstrząsu E_c jest to z kolei całkowita energia sprężysta wypromieniowana ze źródła i jest sumą energii fal podłużnych i poprzecznych. Wyznacza się ją przy pomocy pomiarów strumienia energii obu fal, zarejestrowanych na wielu stanowiskach pomiarowych, najlepiej równomiernie rozłożonych wokół ogniska. Strumień energii fali sejsmicznej można przedstawić następującym równaniem:

$$E_c = \rho * v * \int_0^{\infty} [V(\omega)]^2 d\omega$$

gdzie:

ρ – gęstość ośrodka,

v – prędkość fali sejsmicznej,

a $[V(\omega)]^2$ – kwadrat prędkości drgań gruntu.

Promień dyslokacji jest odwrotnie proporcjonalny do częstotliwości narożnej i wprost proporcjonalny do prędkości fali poprzecznej lub podłużnej w ognisku, pomnożony przez stały współczynnik l zależny od modelu ogniska, co można zapisać:

$$R = \frac{V(S,P)}{f(S,P)} * l$$

Z wartości momentu sejsmicznego i promienia ogniska można wyznaczyć średni spadek naprężeń. Parametr ten silnie zależy od przyjętego modelu źródła i przedstawia jednolitą redukcję naprężenia ścinania, powodującego poślizg na uskoku kołowym. 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.

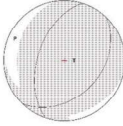
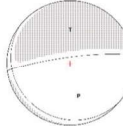
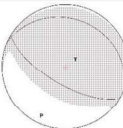
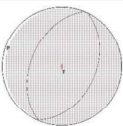
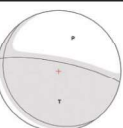
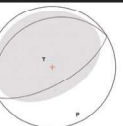
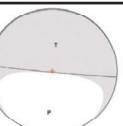
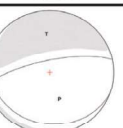
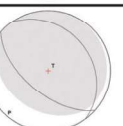
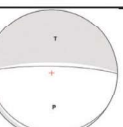
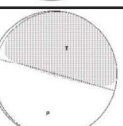
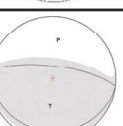
Miarą rozładowania naprężeń jest również naprężenie pozorne A_s , określone jako wartość energii wyzwolonej w formie fal sejsmicznych na jednostkę powierzchni uskoku i jednostkę przemieszczenia. Jest to parametr niezależny od modelu ogniska i może służyć jako wskaźnik do oceny sposobów rozładowywania naprężeń w ogniskach wstrząsów.

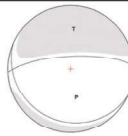
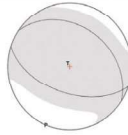
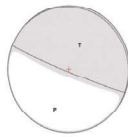
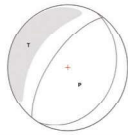
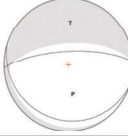
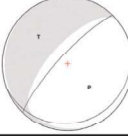
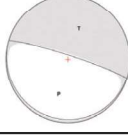
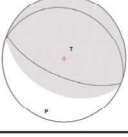

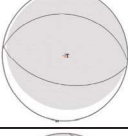
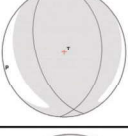
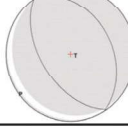
$$A_s = \frac{E_c}{M_0} * \mu$$

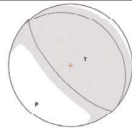
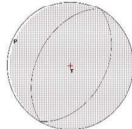
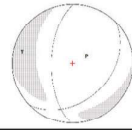
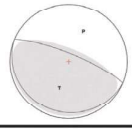
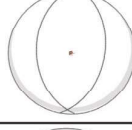
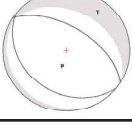
Jako miarę efektywności sejsmicznej można wykorzystać również stosunek naprężenia pozornego i statycznego spadku naprężeń. Jeżeli wartość tego parametru jest równa 0,5, to zjawiskiem dominującym jest zjawisko ścinania i występuje ono w górotworze o nienaruszonej strukturze, natomiast jeżeli stosunek ten jest dużo mniejszy od 0,5, zjawiska sejsmiczne powstają na istniejących strefach osłabienia górotworu (Kwiatkiewicz, 2009).

Wyniki obliczeń dla rozwiązania pełnego tensora mechanizmu ognisk dla wstrząsów o energii sejsmicznej od $1 \cdot 10^5$ J przedstawiono w tabeli 3, natomiast wyznaczone parametry spektralne dla wstrząsów o energii sejsmicznej od $1 \cdot 10^5$ J w tabeli 4.

Tabela 3. Wyniki obliczeń mechanizmów ognisk analizowanych wstrząsów o energii sejsmicznej od $1 \cdot 10^6$ J
 Table 3. Results of calculations of focal mechanisms of analyzed tremors with seismic energy from $1 \cdot 10^6$ J

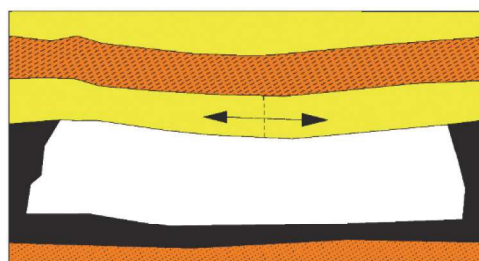
Lp.	Data czas	Energia [J]	Płaszczyzny nodalne (trend° / zagłębienie° kierunek°)		Osie naprężeń (trend° / zagłębienie°)		Graficzny model ogniska	Składowe tensora [%]		
			A	B	P	T		ISO	LDS	DC
1	22.03.2018 16:51	2.0E+06	197,8 / 54 74	43,8 / 38,9 110,7	299/8	59/75		32.3	61.1	6.6
2	29.03.2018 12:52	1.0E+07	262,6 / 81,8 -98,6	129,3 / 11,8 -43,9	163/52	0/36		-14.8	-24.9	60.3
3	7.04.2018 2:19	3.0E+06	120,6 / 67 92,9	293,1 / 23,2 83,2	208/22	36/68		26.1	48.1	25.1
4	17.04.2018 15:44	5.0E+06	202,7 / 47 88,5	24,8 / 43 91,6	294/2	85/88		33.2	66.5	0.3
5	20.04.2018 12:53	4.0E+05	281,2 / 78 79,4	143,1 / 15,9 130,8	20/32	178/56		15	19,6	65,4
6	24.04.2018 3:07	2.0E+05	59,5 / 66,2 89,7	240,3 / 23,8 90,8	150/21	329/69		20.6	50.5	28.9
7	25.04.2018 9:46	6.0E+05	95,4 / 88,2 90,6	256 / 1,9 70,6	185/43	6/47		6,8	-21,7	71,5
8	27.04.2018 3:38	3.0E+05	258,5 / 74,6 99,2	110 / 17,9 - 59,8	156/59	356/29		-20,7	-34,2	45,1
9	27.04.2018 16:14	1.0E+05	130,9 / 60,1 83,5	323,9 / 30,6 101,2	226/15	24/74		29,1	64,4	9,1
10	30.04.2018 22:22	9.0E+05	270,8 / 81,7 94,9	121,7 / 9,7 - 59,5	175/53	5/37		-9,9	-19,9	70,6
11	04.05.2018 11:18	3.0E+06	285,7 / 89,9 -95,8	195 / 5,8 0,7	190/45	21/45		4.7	19.2	76.1
12	07.05.2018 17:15	3.0E+05	277 / 73,8 90	97,2 / 16,2 90,1	7/29	187/61		18,5	34,2	47,3

l.p.	Data czas	Energia [J]	Płaszczyzny nodalne (trend° / zagłębienie° kierunek°)		Osie naprężeń (trend° / zagłębienie°)		Graficzny model ogniska	Składowe tensora [%]		
			A	B	P	T		ISO	LDS	DC
13	7.05.2018 23:44	5.0E+05	267/ 73,6 -98,3	114,3 /18,4 -63,9	165/61	4/28		-12,4	-13	74,5
14	9.05.2018 9:53	6.0E+05	108,4/ 55,1 88,1	33,6 /35,8 102,5	205/10	347/78		30,1	37,8	31,2
15	10.05.2018 9:56	4.0E+05	111,9/ 86,5 88,9	308,9 /3,7 107	203/41	21/49		12,7	22,7	64,6
16	10.05.2018 21:55	8.0E+05	216,4/ 66,9 -87	28,9 /23,7 96,9	132/68	304/22		-29	-53,4	17,6
17	11.05.2018 14:11	4.0E+05	267,3/ 73,5 -92,6	108,1 /17,6 -70	168/61	2/28		-17,1	-35,2	47,7
18	12.05.2018 8:12	3.0E+05	223,6/ 78,9 -95,5	70,2 /12,4 -63,9	127/56	318/34		-19,1	-40,9	40,1
19	14.05.2018 14:21	3.0E+05	287,3/ 84,4 -89,6	102,9 /5,6 -94,4	198/51	107/0		-3,4	-11,8	84,4
20	15.05.2018 16:51	6.0E+05	112,2/ 66,8 91,7	288 /23,3 86,1	201/22	25/68		28	55,6	16,4
21	16.05.2018 8:23	4.0E+05	195,5/ 49 91,7	12,5 /41,1 88,1	284/4	112/86		33	64,4	2,5
22	16.05.2018 15:38	4.0E+05	99,5/ 52,8 92,4	275,4 /37,3 86,8	188/8	22/82		32	65,2	2,8
23	18.05.2018 17:30	6.0E+05	161,2/ 53,5 75,7	4,4 /38,9 108,4	261/7	24/76		31,8	60,8	7,5
24	22.05.2018 1:11	3.0E+05	145,5/ 53,5 88	329 /36,6 92,8	237/8	46/81		33	66,4	0,6

l.p.	Data czas	Energia [J]	Płaszczyzny nodalne (trend° / zagłębienie° / kierunek°)		Osie naprężeń (trend° / zagłębienie°)		Graficzny model ogniska	Składowe tensora [%]		
			A	B	P	T		ISO	LDS	DC
25	24.05.2018 2:49	2.0E+06	275,4 / 76,9 67	157,3 / 26,3 149,2	24/28	158/53		17.1	7	75.9
27	29.05.2018 13:00	4.0E+07	208 / 46,6 89,3	29 / 43,4 90,7	298/2	102/88		33.2	66.6	0.2
28	6.06.2018 14:45	5.0E+06	181 / 61,3 115,4	45,7 / 37,6 51,9	47/64	289/13		-28.7	-53.6	17.7
29	12.06.2018 6:12	7.0E+05	148,8 / 72,8 -89,5	327,1 / 17,2 -91,7	60/62	238/28		-26.8	-54.2	19
30	12.06.2018 10:09	9.0E+05	22,2 / 48,3 -79,8	187,1 / 42,7 -101	355/82	105/3		-19.8	-19.9	60.3
31	15.06.2018 1:26	9.0E+05	301,7 / 58,5 -93,3	128 / 31,7 -84	202/76	34/13		-18	-18	64

Przeprowadzona analiza oparta na procentowym współczynniku jakości rozwiązania przy uwzględnieniu błędów wyznaczenia wskazuje, że prawdopodobna głębokość wystąpienia ognisk analizowanych wstrząsów zawiera się w przedziale od -440m do -690m p.p.m., co potwierdza teorię powstawania ognisk wstrząsów zlokalizowanych w znacznej odległości od pokładu 416. Nie można jednak jednoznacznie określić głębokości wystąpienia ognisk analizowanych wstrząsów z uwagi na bardzo małe różnice błędów dopasowania rozwiązania dla badanych głębokości.

Analizowane wstrząsy w dużej mierze charakteryzowały się znacznym udziałem składowej eksplozywnej i jednoosiowego ściskania bądź rozciągania (charakterystyczna cecha wstrząsów indukowanych). Wyjątkowo duży udział tych składowych świadczy o procesach nacisku warstw stropowych na niewyekspluowane części pokładu. Jednocześnie, uwzględniając fakt wzrostu aktywności sejsmicznej po połączeniu się (powiększeniu) powierzchni zrobów ściany 413 ze zrobami wyeksploatowanej ściany 415, duży udział składowej LDS może świadczyć o rozrywie twardych skał stropowych spowodowanym ich ugięciem (rozciąganiem) na odcinku prowadzenia ściany wzdłuż zrobów zawałowych. Uproszczony schemat działania poziomej rozciągającej pary sił odpowiadającej tensyjnemu pękaniu stropu nad wyrobiskiem przedstawiono na rysunku 4. Procentowy udział składowej izotropowej mieści się w granicach od 3,4% do 33,2%, natomiast procentowy udział składowej odpowiadającej za jednoosiowe ściskanie bądź rozciąganie (LDS) mieści się w granicach od 7% do 66,6%. Procentowy udział składowej ścinającej mieści się w granicach od 0,3% do 84,4%.



Rys. 4. Uproszczony schemat działania poziomej rozciągającej pary sił

Fig. 4. Simplified scheme of horizontal operation extending a pair of forces

Analizując procentowe zawartości poszczególnych składowych i kolejności wystąpienia przedmiotowych zjawisk sejsmicznych, można zauważyć pewną zależność. Wstrząsy charakteryzujące się dominującym udziałem składowej ścinającej PPS, występowały po serii wstrząsów o przeważającym udziale LDS. Powyższa sekwencja występujących po sobie zjawisk sejsmicznych, uwzględniając azymut płaszczyzn nodalnych, generalnie równoległy do postępującego frontu ściany lub wyrobisk konturujących ścianę pozwala założyć, że przyczyną rejestrowanej wzmożonej aktywności sejsmicznej były typowe procesy zniszczeniowe, będące wynikiem załamania i w konsekwencji pękania sztywnych kompleksów skał stropowych zalegających nad pokładem 416. Położenie i graficzny model ogniska wstrząsów o energiach od $1 \cdot 10^5$ J zlokalizowanych w rejonie ściany 413 przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Położenie i mechanizm wstrząsów o energiach od $1 \cdot 10^5$ J zlokalizowanych w rejonie ściany 413
 Fig. 5. Location and focal mechanisms of tremors with energies from $1 \cdot 10^5$ J located in the area of the wall no. 413

Tabela 4. Parametry spektralne analizowanych wstrząsów o energii sejsmicznej od $1 \cdot 10^5$ J
 Table 4. Spectral parameters of analyzed tremors with seismic energy from $1 \cdot 10^5$ J

Nr	Data	Godzina	Energia [J]	Moment sejsmiczny (Nm)	Promień ogniska (m)	Spadek naprężeń Sd (MPa)	Napężenia pozorne Np (kPa)	Np/Sd	Energia sejsmiczna [J]
1	2018-03-22	16:51	2,0E+06	1,15E+12	81,2	1,41	34,7	0,025	1,75E+06
2	2018-03-29	12:52	1,0E+07	7,00E+12	125,1	2,33	60,7	0,026	2,70E+07
3	2018-04-07	02:19	3,0E+06	2,36E+12	92,5	2,19	51,7	0,024	9,18E+06
4	2018-04-17	15:44	5,0E+06	4,37E+12	128,4	0,81	18,7	0,023	8,06E+06
5	2018-04-20	12:53	4,0E+05	2,60E+11	58	0,66	15,4	0,023	3,08E+05
6	2018-04-24	03:07	2,0E+05	1,87E+12	74	2,92	62,7	0,021	9,81E+06
7	2018-04-25	09:46	6,0E+05	5,21E+12	66,7	6,30	122	0,019	5,00E+07
8	2018-04-27	03:38	3,0E+05	7,29E+11	96,8	0,38	8,36	0,022	3,33E+05
9	2018-04-27	16:14	1,0E+05	1,81E+11	54,8	0,56	15,4	0,027	1,81E+05
10	2018-04-30	22:22	9,0E+05	8,97E+11	75,1	1,13	21,4	0,019	1,09E+06
11	2018-05-04	11:18	3,0E+06	1,94E+12	95,6	0,97	22,4	0,023	2,92E+06
12	2018-05-07	17:15	3,0E+05	5,46E+11	62,6	1,55	18,9	0,012	7,21E+05
13	2018-05-07	23:44	5,0E+05	4,02E+11	74,6	1,04	24	0,023	4,35E+05
14	2018-05-09	09:53	6,0E+05	6,60E+12	81,3	6,75	144	0,021	6,07E+07

Tabela 4. cd.

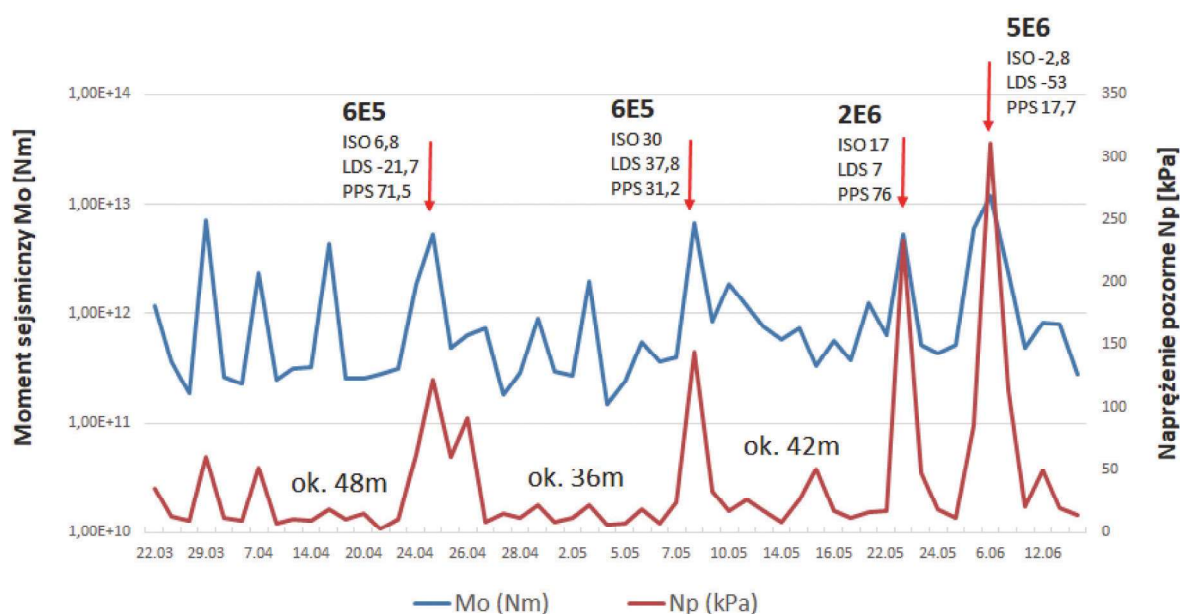
15	2018-05-10	09:56	4,0E+05	8,49E+11	71,7	1,56	32,7	0,021	1,04E+06
16	2018-05-10	21:55	8,0E+05	1,86E+12	106,7	0,61	17,5	0,029	1,72E+06
17	2018-05-11	14:11	4,0E+05	1,16E+12	101,3	1,10	26,5	0,024	1,65E+06
18	2018-05-12	08:12	3,0E+05	7,65E+11	79,3	0,72	17,3	0,024	1,14E+06
19	2018-05-14	14:21	3,0E+05	5,86E+11	84,3	0,63	8,58	0,014	3,27E+05
20	2018-05-15	16:51	6,0E+05	7,26E+11	76,2	1,46	25,8	0,018	1,14E+06
21	2018-05-16	08:23	4,0E+05	3,30E+11	53,7	2,22	50,5	0,023	1,17E+05
22	2018-05-16	15:38	4,0E+05	5,66E+11	81,7	0,75	17,4	0,023	6,56E+05
23	2018-05-18	17:30	6,0E+05	1,24E+12	93,5	0,84	16	0,019	7,72E+05
24	2018-05-22	01:11	3,0E+05	6,36E+11	81,5	0,80	17,5	0,022	5,63E+05
25	2018-05-24	02:49	2,0E+06	5,23E+12	62,6	8,96	233	0,026	7,71E+07
26	2018-05-26	00:03	2,0E+05	5,12E+11	83,8	0,43	12,2	0,028	4,28E+05
27	2018-05-29	13:00	4,0E+07	5,94E+12	107	3,14	86,3	0,027	3,39E+07
28	2018-06-06	14:45	5,0E+06	1,18E+13	76,4	11,60	311	0,027	1,68E+08
29	2018-06-12	06:12	7,0E+05	4,83E+11	69,7	0,76	20,9	0,028	7,92E+05
30	2018-06-12	10:09	9,0E+05	8,30E+11	61,9	1,90	49,1	0,026	3,21E+06
31	2018-06-15	01:26	9,0E+05	8,07E+11	75,6	0,95	19,2	0,020	9,44E+05

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 tąpnięciami i wstrząsami. Wartości momentów sejsmicznych uzyskanych w trakcie analizy spektralnej dla wstrząsów o energii sejsmicznej wyższej lub równej $1 \cdot 10^5$ J wahają się w przedziale od $1,81 \cdot 10^{11}$ do $1,18 \cdot 10^{13}$ Nm.

Parametrem dającym informacje odnośnie aktualnego stanu zagrożenia wstrząsami i tąpnięciami jest naprężenie pozorne. Jest ono dość uniwersalnym parametrem, gdyż jest praktycznie niezależne od modelu źródła sejsmicznego, niestety z reguły nie odwzorowuje rzeczywistego spadku naprężeń (Kwiątek, 2009). Wysokie wartości naprężenia pozornego wskazują na wysokie zagrożenie sejsmiczne, dlatego parametr ten może służyć jako wskaźnik do poprawy precyzyjnej predykcji tego zagrożenia. Wartości naprężenia pozornego analizowanych

wstrząsów wahają się w przedziale od 8,36 do 311 kPa, co z uwagi na duży rozrzut otrzymanych wartości potwierdza słuszność powyższych założeń i może świadczyć o zmianach chwilowego stanu zagrożenia. Wykres zmian momentu sejsmicznego naprężenia pozornego analizowanych wstrząsów przedstawiono na rysunku 6.

Na rysunku 6 przedstawiono dla porównania wykres zmian momentu sejsmicznego oraz zmian wartości naprężenia pozornego analizowanych wstrząsów. W czasie prowadzenia eksploatacji pokładu 416 ścianą 413 na analizowanym odcinku biegu ściany cyklicznie rejestrowane były wstrząsy o niskich wartościami naprężenia pozornego charakteryzujące się głównie mechanizmem o dominującym udziale składowej LDS. Natomiast wstrząsy o wysokich wartościach naprężenia pozornego posiadały znaczny udział składowej ścinającej (31,2% - 76%). Wstrząs o energii 510^6 J najprawdopodobniej doprowadził do ustabilizowania się stanu naprężeń w rejonie, gdyż w późniejszym etapie prowadzenia ściany 413 rejestrowano wstrząsy o energii



Rys. 6. Wykres zmian momentu sejsmicznego oraz zmian wartości naprężenia pozornego analizowanych wstrząsów
Fig. 6. Graph of changes in the seismic moment and changes in the apparent stress value of the analyzed shocks

maksymalnie rzędu 10^4 J. Dodatkowo, wyznaczone wartości naprężenia pozornego zwiększały się wraz ze zwiększającą się powierzchnią zrobów ściany 413, co również może dawać dodatkową informację o zmieniającym się stanie zagrożenia w rejonie. Jak wskazuje wyżej przedstawiony wykres, naprężenie pozorne jest parametrem, który w sposób bardziej jednoznaczny wykazuje zmiany rejestrowanego stanu zagrożenia sejsmicznego w porównaniu do momentu sejsmicznego.

Stopień odprężenia górotworu po wystąpieniu zjawiska sejsmicznego określony na podstawie wartości statycznego spadku naprężeń dla wstrząsów o energii sejsmicznej wyższej lub równej $1 \cdot 10^5$ J wahają się w przedziale od 0,38 do 11,6 MPa.

Stosunek naprężenia pozornego i statycznego spadku naprężeń (efektywność sejsmiczna) dla analizowanych wstrząsów wahający się w granicach od 0,012 do 0,029 świadczy o istniejących strefach osłabienia górotworu, co jest charakterystyczne dla wstrząsów związanych bezpośrednio z prowadzoną eksploatacją. Na rysunku 7 przedstawiono wykres zależności naprężenia pozornego i statycznego spadku naprężeń.

5. Podsumowanie

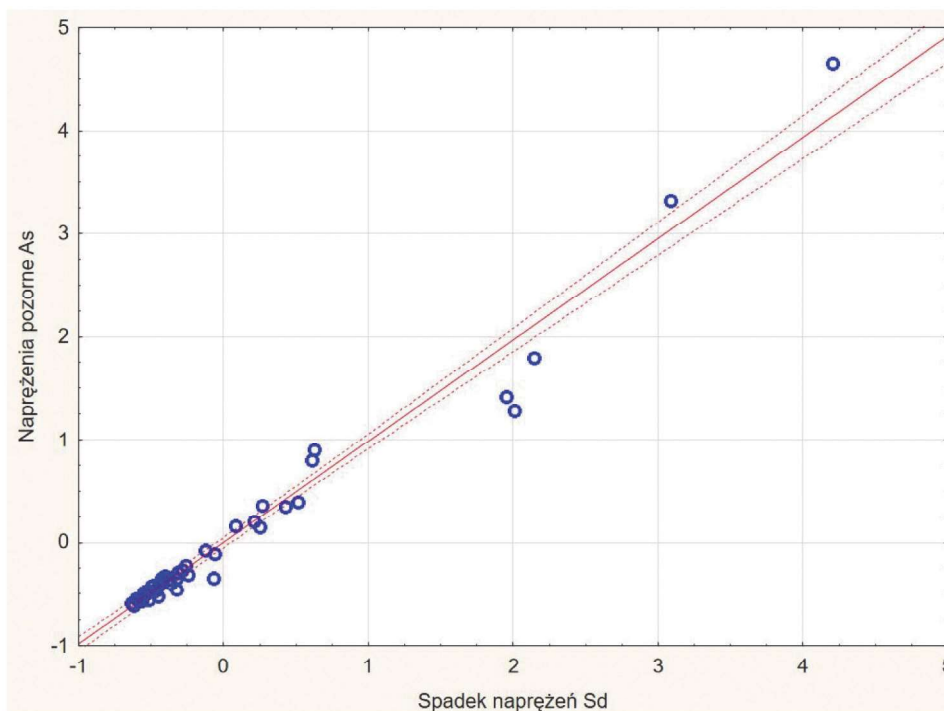
Stan zagrożenia tąpnięciami w partii A zachód w trakcie eksploatacji pokładu 416 ścianą 413 w głównej mierze kształtowany był koincydencją niekorzystnych warunków górniczych, do których możemy zaliczyć dużą głębokość prowadzonych robót, przemieszczający się front ściany i jego oddziaływanie na wyżej zalegające grube warstwy skał stropowych zdolnych do kumulowania i nagłego wyładowywania energii sprężystej oraz powiększająca się objętość przestrzeni zrobowej. Typ mechanizmów ognisk wstrząsów, ich szacun-

kowa głębokość oraz azymut płaszczyzn nodalnych pozwalają założyć, iż główną przyczyną rejestrowanej wzmożonej aktywności sejsmicznej były typowe procesy zniszczeniowe, będące wynikiem początkowo ugięcia, a następnie pęknięcia sztywnych kompleksów skał stopowych zalegających nad pokładem 416. Postępujący front ścianowy i opisana powyżej aktywność sejsmiczna w wyniku rozładowania naprężeń skumulowanych w górotworze doprowadziła do ustabilizowania nowego układu równowagi w przedmiotowym rejonie, co doprowadziło do spadku aktywności sejsmicznej.

Zmiana parametrów mechanizmu i spektralnych parametrów ognisk wstrząsów górotworu wykazuje zależność od stanu zagrożenia sejsmicznego, a śledzenie tych zmian może dostarczyć dodatkowych informacji o stanie zagrożenia i może być wykorzystana do poprawy efektywności jego oceny.

Literatura

- DĘBSKI W. 2012 - Tomografia sejsmiczna w zastosowaniach górniczych. „Przeгляд Górnicy” 68(7), 67-71.
- GĄSKA R., KRUPANEK J., MISZ K. 2018 - Kształtowanie się zagrożenia wstrząsami i tąpnięciami w trakcie eksploatacji pokładu 510 w partii A wschód w PGG S.A. Oddział KWK Mysłowice-Wesoła, z uwzględnieniem aktywnej profilaktyki tąpniowej. „Wiadomości Górnice” 1-2.
- GIBOWICZ S., KIJKO A. 1994 - An introduction to mining seismology. Wyd. Academic Press, San Diego, California.
- GIBOWICZ S. 1989 - Mechanizm ognisk wstrząsów górniczych. Państwowe Wydawnictwo Naukowe; Warszawa-Lódź.
- GIBOWICZ S. 1995 - Mechanizm ognisk wstrząsów górniczych. Szkoła Eksploatacji Podziemnej nr 8; Szczyrk.
- GIBOWICZ S., LASOCKI S. 2001 - Seismicity induced by mining: Ten years later. Advances in Geophysics, vol. 44.

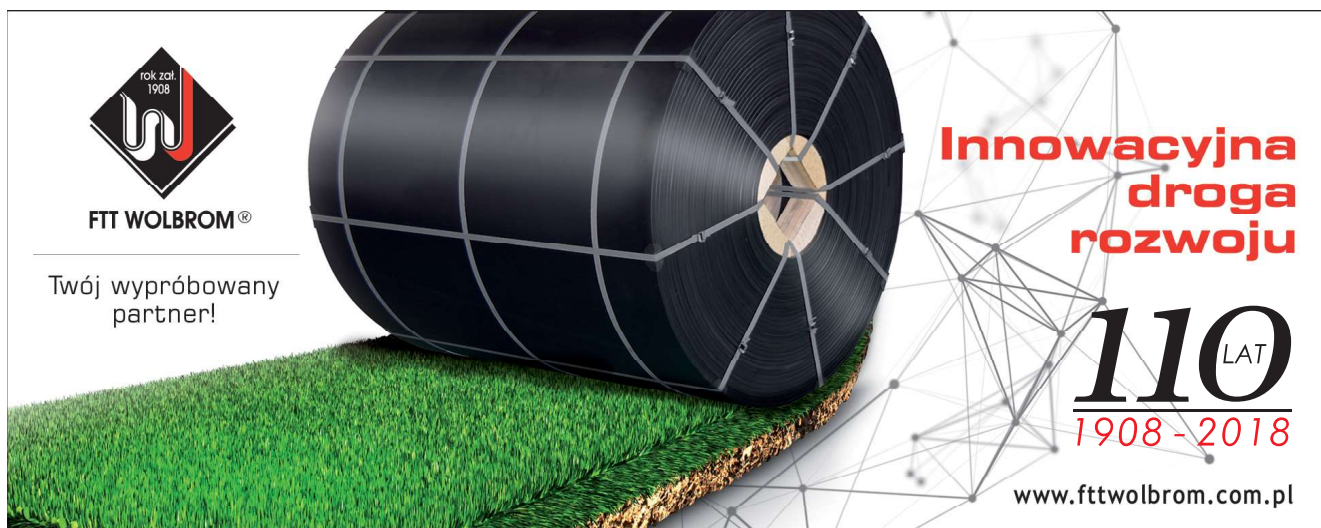



Rys. 7. Wykres zależności naprężenia pozornego i statycznego spadku analizowanych wstrząsów (dla danych znormalizowanych)

Fig. 7. Graph of dependence of apparent and static stress on the decrease of analyzed shocks (for normalized data)

- GIBOWICZ S., LASOCKI S. 2001 - Seismicity induced by mining: Ten years later. *Advances in Geophysics* 2001, Vol. 44.
- GOSZCZA., 2004 - Wybrane problemy zagrożenia sejsmicznego i zagrożenia tapaniami w kopalniach podziemnych. Wyd. Nauka-Technika. Kraków.
- KWIATEK G. 2018 – FOCl - Inwersja parametrów ogniska sejsmicznego. (<https://www.induced.pl>).
- MARCAK H., ZUBEREK W. 1994 - Geofizyka górnicza. Śląskie Wyd. Techniczne Katowice.
- STEC K. 2017 - Określenie przyczyny wysokoenergetycznych wstrząsów górotworu na podstawie parametrów mechanizmu ognisk. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk*, nr 101.
- 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
- STEC K., WOJTECKI Ł. 2011 - Charakterystyka mechanizmu ognisk wstrząsów górotworu związanych z eksploatacją pokładu 510 ścianą 502 w KWK „Bielszowice”. *Prace Naukowe GIG. „Górnictwo i Środowisko”* 1/2011.
- ZORYCHTA A. 2018 - Prognoza zagrożenia tapaniami i możliwość wystąpienia wstrząsów wysokoenergetycznych dla projektowanych na lata 2017-2020 robót górniczych w KWK Mysłowice-Wesoła. Kraków. Praca naukowa.

Artykuł wpłynął do redakcji – styczeń 2019
Artykuł akceptowano do druku – kwiecień 2019




FTT WOLBROM®

Twój wypróbowany partner!

**Innowacyjna
droga
rozwoju**

110 LAT
1908-2018

www.fttwolbrom.com.pl