

Piotr KOŁODZIEJCZYK  
Politechnika Śląska, Gliwice

## SEISMOLOGICZNA OCENA STANU ZAGROŻENIA TĄPANIAMI Z WYKORZYSTANIEM ELEMENTÓW LOGIKI ROZMYTEJ

**Streszczenie.** Obowiązujący system oceny stanu zagrożenia tąpnięciami jest bardzo złożony, z uwagi na konieczność stosowania wielu różnych metod szczegółowych. Wykorzystując niektóre pojęcia z zakresu teorii zbiorów rozmytych można dokładniej opisać rzeczywisty stan zagrożenia tąpnięciami, jednocześnie eliminując mankamenty obowiązującej metodyki oceny. Ponadto zastosowanie logiki rozmytej umożliwia kwantyfikację tego zagrożenia w unormowaniu 0-1, a także ocenę jego zmienności w czasie – określenie trendu. W artykule przedstawiono modyfikację seismologicznej oceny zagrożenia tąpnięciami, w odniesieniu do wyrobiska górniczego na przykładzie ściany podsadzkowej.

## SEISMOLOGICAL ASSESSMENT OF ROCKBURST RISK LEVEL USING ELEMENTS OF FUZZY LOGIC

**Summary.** Obligatory system of assessment of rockburst risk level is so complex because of necessity of using many different detailed methods. It is possible to describe the real risk level of rockburst more detail by using some notions from fuzzy sets theory, it also allow to eliminate faults of obligatory methods of estimates. Using fuzzy logic enables quantification in normalizing 0-1, as well as estimate variability in time – determination of trend. This article presents modification of seismological assessment of rockburst risk level reference to mining excavation on example of longwall with hydraulic backfill.

### 1. Wprowadzenie

Zagrożenie tąpnięciami pozostaje nadal, pomimo dokonanego postępu wśród metod oceny stanu zagrożenia, jak i metod jego zwalczania, jednym z najgroźniejszych zagrożeń naturalnych. Konieczne jest więc, stałe rozwijanie metod umożliwiających prognozę stanu zagrożenia. Tąpnięcia, z punktu widzenia geomechanicznego, są wynikiem procesów

dynamicznych, zachodzących w górotworze i związane są z gwałtownym uwolnieniem się energii sprężystej, nagromadzonej w ośrodku skalnym. Współcześnie przez tąpnięcie rozumie się nagłe i gwałtowne zniszczenie odcinka wyrobiska, które poprzedza lub, któremu towarzyszy wstrząs górotworu. Zjawisko to może również stwarzać zagrożenie dla osób znajdujących się w zasięgu jego oddziaływania. Największy wpływ na występowanie tapań ma głębokość zalegania złoża, a więc wielkość działających ciśnień, przy założeniu prawidłowego prowadzenia eksploatacji, tj. zgodnie z aktualną wiedzą górniczą. W miarę stałego (ok. 3.2 m rocznie) zwiększania głębokości wybierania, w skali światowej, tapania stają się coraz częstsze o wzrostowej tendencji zakresu zniszczeń wyrobisk. Występują praktycznie we wszystkich rejonach eksploatacji węgla, rud miedzi, złota i soli. Wynika stąd, że zjawiska wstrząsów górotworu i tapań są naturalne dla wszystkich obszarów górniczych na całym świecie.

W polskim górnictwie węgla kamiennego, w zakresie prognozy czy też oceny zagrożenia tapaniami, obowiązują dwa systemy. Pierwszy z nich polega na ustaleniu przez Urząd Górniczy jednego z trzech stopni zagrożenia tapaniami. Ustalenie to dotyczy pokładów lub ich części i obowiązuje bezterminowo, tzn. do ustalenia innego stopnia zagrożenia.

Drugi system ustalania stanu zagrożenia tapaniami zawarty jest w obowiązującej „Instrukcji kompleksowej oceny stanu zagrożenia tapaniami w zakładach górniczych wydobywających węgiel kamienny”. System oceny zawiera szereg metod szczegółowych: rozeznania górniczego, sejsmologii górniczej, sejsmoakustyczną i wiercenia otworów małośrednicowych. Metoda kompleksowa oraz metody szczegółowe operują klasyfikacją stanów zagrożenia, w odniesieniu do konkretnego wyrobiska (stan a, b, c, d i NB). Stan „a” nie pociąga za sobą żadnych ograniczeń, w pozostałych stanach ograniczenia i wymogi profilaktyczne narastają aż do zaniechania eksploatacji. Ustalenie stanu ma charakter chwilowy i służy wymuszeniu takich zabiegów profilaktycznych, które w konsekwencji doprowadzą do jego obniżenia.

Istniejący system ustalania stanu zagrożenia tapaniami jest bardzo skomplikowany, a przy stosowaniu wielu różnych metod szczegółowych, niespójny i niezbyt dokładny.

W oparciu o elementy teorii zbiorów rozmytych istnieje możliwość modyfikacji metod szczegółowych, jak również metody kompleksowej. Stosując niektóre pojęcia z zakresu teorii zbiorów rozmytych można precyzyjniej opisać rzeczywisty stan zagrożenia tapaniami. Ponadto, zastosowanie logiki rozmytej umożliwia kwantyfikację tego zagrożenia w unormowaniu 0-1, a także śledzenie fluktuacji wskaźnika stanu zagrożenia tapaniami w czasie czy też wyznaczanie jego trendu.

## 2. Sejsmologiczna ocena stanu zagrożenia w ujęciu logiki rozmytej

Istniejąca klasyfikacja stanów zagrożenia tapaniami metodą sejsmologiczną jest niezbyt dokładna. Pojęcia dotyczące oceny stanu zagrożenia, w istniejącej klasyfikacji stanów zagrożenia tapaniami, mają charakter lingwistyczny, ustalony przez ekspertów górniczych na podstawie dotychczasowych badań i doświadczeń praktyki górniczej.

Metoda sejsmologii górniczej oceny stanu zagrożenia tapaniami, podobnie jak pozostałe metody szczegółowe (metoda sejsmoakustyczna i wierceń otworów małosrednicowych), wchodzące w skład metody kompleksowej [1], definiuje czterostopniową skalę zagrożenia tapaniami wyrobisk górniczych:

- stan zagrożenia "a" - wyrobisko niezagrożone tapaniami,
- stan zagrożenia "b" - wyrobisko słabo zagrożone tapaniami,
- stan zagrożenia "c" - wyrobisko średnio zagrożone tapaniami,
- stan zagrożenia "d" - wyrobisko silnie zagrożone tapaniami.

Powyższa skala oceny stanu zagrożenia odpowiada pojęciu zbioru rozmytego.

Zbiorem rozmytym  $A$  w przestrzeni  $X$  jest zbiór uporządkowanych par [2]:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\}, \quad (1)$$

gdzie funkcja przynależności zdefiniowana jest jako:

$$\mu_A : X \rightarrow [0,1]$$

Przykładem zbioru rozmytego może być "zbiór ludzi wysokich". Oczywiście niektórzy ludzie są wysocy (przynależność 1), inni zaś nie (przynależność 0), jest jednak duża grupa ludzi pomiędzy tymi dwiema skrajnościami, dla których funkcja przynależności przyjmuje wartości pośrednie.

Wobec tego, jeżeli  $A$  jest zbiorem rozmytym stanu zagrożenia, to funkcję przynależności  $\mu_A$  (kryterium oceny stanu zagrożenia metody sejsmologicznej) można zdefiniować np. następująco:

- stan zagrożenia a :  $0 \leq \mu_A < 0,25$  - wyrobisko niezagrożone,
- stan zagrożenia b :  $0,25 \leq \mu_A < 0,50$  - wyrobisko słabo zagrożone,
- stan zagrożenia c :  $0,50 \leq \mu_A < 0,75$  - wyrobisko średnio zagrożone,
- stan zagrożenia d :  $0,75 \leq \mu_A \leq 1$  - wyrobisko silnie zagrożone.

Zasady prowadzenia obserwacji i interpretacji pomiarów metodą sejsmologiczną obejmują zarówno ocenę jakościową, jak i ilościową [1].

## 2.1. Ocena jakościowa

Istotą sejsmologicznej oceny stanu zagrożenia tąpnięciami są obserwacje zmian, zachodzących na dotychczasowym poziomie sejsmiczności w rejonie danego wyrobiska i określenie wynikającego z nich stopnia wzrostu, względnie spadku zagrożenia, w stosunku do dotychczasowego. Poziom sejsmiczności określany jest umownie w oparciu o analizę ilości i energii wstrząsów, w określonym okresie czasu (zazwyczaj doba). Zgodnie z cytowaną wcześniej instrukcją, w przypadku gdy nie jest możliwe zastosowanie kryteriów ilościowych, należy oceniać stan zagrożenia w oparciu o jakościowe parametry obserwowanej sejsmiczności.

Jeżeli przyjmiemy, że stan zagrożenia tąpnięciami w wyrobiskach jest tym wyższy, im większa jest energia wstrząsów rejestrowanych w rejonie wyrobiska, to funkcję przynależności stanu zagrożenia, w zależności od energii wstrząsów, można określić następującym wzorem:

$$\mu_{A_i}(\log(E_i)) = \begin{cases} 0 & \text{dla } \log(E_i) < a_i \\ \frac{\log(E_i) - a_i}{b_i - a_i} & \text{dla } a_i \leq \log(E_i) < b_i \\ 1 & \text{dla } \log(E_i) \geq b_i \end{cases}, \quad (2)$$

gdzie:  $i = 1, 2$

$i=1$  dotyczy głównej aktywności sejsmicznej,

$i=2$  dotyczy wstrząsów o charakterze sporadycznym,

$a_i, b_i$  - współczynniki,

$E_i$  - energia wstrząsu.

W tabelicy 1 przedstawiono wartości  $\mu_{A_i}(\log(E_i))$  w zależności od logarytmu maksymalnych energii wstrząsów, odpowiadających głównej aktywności sejsmicznej i energii wstrząsów sporadycznych (ujętych w ocenie jakościowej metody sejsmologicznej).

Według danych zawartych w tabelicy 1 można stwierdzić, że funkcja przynależności  $\mu_{A_i}$  jest funkcją liniową typu:

$$y = ax + b \quad (3)$$

Tablica 1

Wartości  $\log(E_i)$  dla granicznych wartości  $\mu_{Ai}(\log(E_i))$ 

$\mu_{Ai}$		0	0.25	0.50	0.75	1
$\log(E_1)$	śc. zawałowa	2	3	4	5	6
	śc. podsadzkowa	1	2	3	4	5
	chodnik		1	2	3	4
$\log(E_2)$	śc. zawałowa	4	5	6	7	
	śc. podsadzkowa	3	4	5	6	
	chodnik		2	3	4	5

Wartości współczynników  $a$  i  $b$  wzoru (3), wyznaczone według metody najmniejszych kwadratów, wynoszą:

$$\bar{b} = \frac{L_{xy}}{L_{xx}} = \frac{\sum x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sum x_i^2 - n \bar{x}^2} \quad (4)$$

$$\bar{a} = \bar{y} - \bar{b} \bar{x}$$

gdzie kreska nad danym współczynnikiem oznacza oszacowanie lub wartość średnią.

Stąd:

$$a_i = -\frac{c}{d}$$

$$b_i = \frac{1 - c}{d} \quad (5)$$

Wartości poszukiwanych współczynników  $a_i$  oraz  $b_i$ , obliczone z powyższych wzorów przedstawia tablica 2.

Tablica 2

Wartości współczynników  $a_i$  i  $b_i$  dla trzech rodzajów wyrobiska

Wartości parametru $a_i$ i $b_i$		Rodzaj wyrobiska		
		ściana zawałowa	ściana podsadzkowa	chodnik
$\log(E_1)$	$a_1$	2	1	0
	$b_1$	6	5	4
$\log(E_2)$	$a_2$	4	3	2
	$b_2$	8	7	6

Ostatecznie wartość funkcji przynależności dla seismologicznej oceny jakościowej stanu zagrożenia tąpnięciami ustala się według wzoru:

$$\mu_A(\log(E)) = \bigvee_{i=1}^2 \{\mu_{A_i}(\log(E_i))\} = \max \{\mu_{A_1}(\log(E_1)), \mu_{A_2}(\log(E_2))\} \quad (6)$$

## 2.2. Ocena ilościowa

Ilościowa ocena stanu zagrożenia tąpnięciami wyrobisk górnictwa prowadzona jest w oparciu o następujące, podstawowe parametry seismologiczne, określone dla wstrząsów występujących w rejonie wyrobiska:

1. występowanie sejsmiczności w poszczególnych klasach energetycznych oraz maksymalna energia  $E_{\max}$ ,
2. suma energii sejsmicznej wydzielanej w określonej jednostce czasu, postępu lub cyklu technologicznego,
3. energia wstrząsów indukowanych strzelaniami wstrząsowo - odprężającymi  $E_{st}$ ,
4. obserwowane skutki wstrząsów w wyrobiskach,
5. wartość stosunku sumy energii ( $\Sigma E$ ) do sumy energii średniej ( $\Sigma E_{sr}$ ), liczonej na 5 m postępu dla ścian zawałowych lub 1 cykl dla ścian podsadzkowych  $\Sigma E / \Sigma E_{sr}$ .

Według tych parametrów funkcję przynależności dla ilościowej oceny seismologicznej stanu zagrożenia tąpnięciami można określić wzorem:

$$\mu_{B_i}(\log(E_i)) = \begin{cases} 0 & \text{dla } \log(E_i) < a_i \\ \frac{\log(E_i) - a_i}{b_i - a_i} & \text{dla } a_i \leq \log(E_i) < b_i \\ 1 & \text{dla } \log(E_i) \geq b_i \end{cases}, \quad (7)$$

gdzie:

$i = 1, 2, \dots, 5$  - numer podstawowego parametru seismologicznego,

$a_i$  i  $b_i$  - współczynniki.

Przyjmujemy, że:

$$E_1 = E \quad (8)$$

$$E_2 = E_{\max} \quad (9)$$

$$E_3 = \sum E/5m \text{ dla ścian zawałowych i chodników}$$

lub

$$E_3 = \sum E/\text{cykl} \text{ dla ścian podsadzkowych} \quad (10)$$

$$E_4 = E_{strz} \quad (11)$$

$$E_5 = \frac{\sum E/5m}{\sum E_{str}/5m} \text{ dla ścian zawałowych i chodników}$$

lub

$$E_5 = \frac{\sum E/\text{cykl}}{\sum E_{str}/\text{cykl}} \text{ dla ścian podsadzkowych} \quad (12)$$

Na podstawie wzorów (8-12) w tabelicy 3 przedstawiono wartości  $\mu_{Bi}(\log(E_i))$ , w zależności od logarytmów energii rejestrowanych wstrząsów.

Tabela 3

Wartości  $\log(E_i)$  dla granicznych wartości  $\mu_{Bi}(\log(E_i))$

	$\mu_{Bi}$	0	0.25	0.5	0.75
$\log(E_1)$	śc. zawałowa	2	3	5	6
	śc. podsadzkowa	2	3	4	5
	chodnik	1	2	3	4
$\log(E_2)$	śc. zawałowa	3	4	5.699	6.699
	śc. podsadzkowa	3	3.699	4.699	6
	chodnik	2	2.699	3.699	5
$\log(E_3)$	ściana zawałowa	4	5	6	7
	śc. podsadzkowa	4	4.699	5.699	6
	chodnik	2	3	4	5
$\log(E_4)$	ściana zawałowa	0	2	4.699	6.699
	śc. podsadzkowa	0	2	4.699	6
	chodnik	0	1	3.699	5
$\log(E_5)$	ściana zawałowa			300%	1000%
	śc. podsadzkowa			300%	1000%
	chodnik				100%

Na podstawie danych zawartych w tabelicy 3 można stwierdzić, że funkcja przynależności  $\mu_{B_i}(\log(E_i))$  dla  $i=1,2,\dots,5$  jest funkcją liniową. Wartości współczynników  $a_i$  oraz  $b_i$  można wyznaczyć, podobnie jak w przypadku jakościowej oceny zagrożenia tapaniami, np. metodą najmniejszych kwadratów.

Wartości współczynników  $a_i$ ,  $b_i$  oraz korelacji  $R_i$ , w zależności od rodzaju wyrobiska, przedstawia tabela 4.

Tabela 4

Wartości współczynników  $a_i$ ,  $b_i$  oraz korelacji  $R_i$ 

Wartości parametru $a_i$ i $b_i$ oraz $R_i$		Rodzaj wyrobiska		
		ściana zawałowa	ściana podsadzkowa	chodnik
$\log(E_1)$	$a_1$	1.1444	2	1
	$b_1$	8.055	6	5
	$R_1$	0.9579	1.00	1.00
$\log(E_2)$	$a_2$	2.9067	2.8224	1.8224
	$b_2$	8.088	6.8941	5.8941
	$R_2$	0.9944	0.9911	0.9911
$\log(E_3)$	$a_3$	4	4.011	2
	$b_3$	8	6.9135	6
	$R_3$	1.00	0.9822	1.00
$\log(E_4)$	$a_4$	0.0652	0	0.3153
	$b_4$	9.1043	8.3915	7.622
	$R_4$	0.9977	0.9921	0.9843

Wartość funkcji przynależności  $\mu_{B_5}(\log(E_5))$  jest równa 0, gdy  $\Sigma E/5m = 0$  lub  $\Sigma E/\text{cykl} = 0$ .

Pozostałe wartości tej funkcji dla ścian zawałowych i podsadzkowych można określić wzorem:

$$\mu_{B_5}(\log(E_5)) = \begin{cases} 0 & \text{dla } \log(E_5) < 0 \\ \frac{\log(E_5)}{6} & \text{dla } 0 \leq \log(E_5) < 300\% \\ \frac{\log(E_5)}{28} + \frac{11}{28} & \text{dla } 300\% \leq \log(E_5) < 1700\% \\ 1 & \text{dla } \log(E_5) \geq 1700\% \end{cases} \quad (13)$$



Namiast dla chodników wartość tej funkcji ma postać:

$$\mu_{B5}(\log(E_5)) = \begin{cases} 0 & \text{dla } \log(E_5) < 0 \\ \frac{13 \log(E_5)}{20} & \text{dla } 0 \leq \log(E_5) < \frac{20}{13} \% \\ 1 & \text{dla } \log(E_5) \geq \frac{20}{13} \% \end{cases} \quad (14)$$

Określenie stanów zagrożenia tąpnięciami dokonuje się w oparciu o parametry sejsmologiczne, według zasady, że stan ten jest równy najwyższemu wyznaczonemu przez jeden z pięciu parametrów podstawowych. Stan zagrożenia - funkcję przynależności  $\mu_B$  dla sejsmologicznej oceny ilościowej stanu zagrożenia tąpnięciami, określa się następującym wzorem:

$$\mu_B(\log(E)) = \bigvee_{i=1}^5 \{ \mu_{B_i}(\log(E_i)) = \max \{ \mu_{B_i}(\log(E_i)) \} \} \quad i = 1, 2, \dots, 5 \quad (15)$$

W metodzie kompleksowej stwierdzono, że dla sejsmologicznej oceny stanu zagrożenia tąpnięciami w sytuacjach, gdzie nie jest możliwe zastosowanie kryteriów ilościowych, należy stosować ocenę opartą na jakościowych parametrach obserwowanej sejsmiczności. W ogólności jednak, stan zagrożenia tąpnięciami metodą sejsmologiczną z wykorzystaniem logiki rozmytej ocenić można jako:

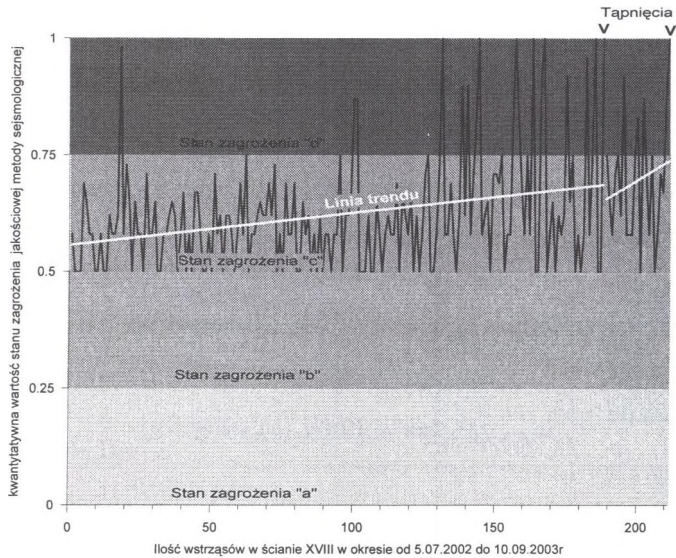
$$\mu_{Sejsmolog} = \max(\mu_A(\log(E)), \mu_B(\log(E))) \quad (16)$$

### 3. Przykład

Ocena stanu zagrożenia tąpnięciami według metody sejsmologicznej z wykorzystaniem elementów logiki rozmytej została przeprowadzona dla rzeczywistej aktywności sejsmicznej, obserwowanej podczas eksploatacji podsadzkowej ściany XVIII w pokładzie 510, w warstwie przyspagowej. Od momentu uruchomienia ściany do pierwszego tąpnięcia w dniu 18.08.2003 r. wystąpiło 187 wstrząsów, w tym 6 wstrząsów wysokoenergetycznych. Częstotliwość występowania wstrząsów wysokoenergetycznych cechowała się regularnością i była adekwatna do aktualnej sytuacji górniczo-geologicznej, tj. przemieszczania się frontu eksploatacji pod równoległe przebiegającą krawędzią resztki w pokładzie 504.

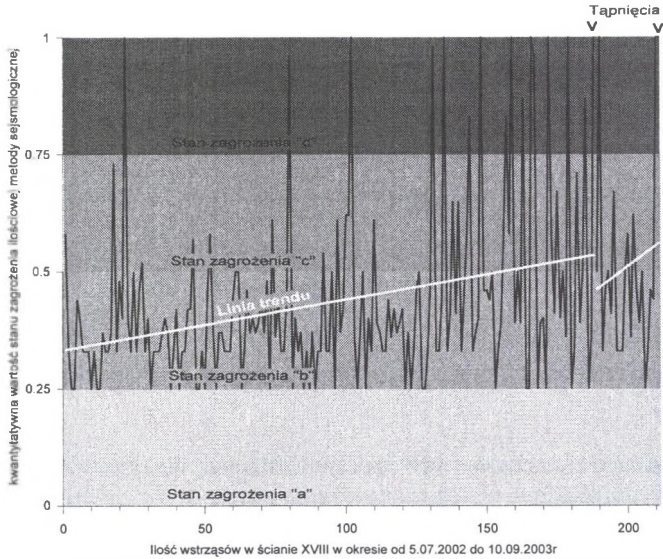
Wstrząs, który spowodował tąpnięcie o energii  $2 \times 10^6 \text{ J}$  zlokalizowany został 150 m przed frontem ściany. Po usunięciu skutków tąpnięcia ściana została uruchomiona w dniu 3.09.2003 r. i po uzyskaniu ok. 7 m postępu wystąpił kolejny wstrząs wysokoenergetyczny o energii  $3 \times 10^6 \text{ J}$ , zlokalizowany ok. 30 m przed frontem ściany, który spowodował kolejne tąpnięcie w dniu 10.09.2003 r.

Na rysunkach 1-3 przedstawiono kształtowanie się zagrożenia tapaniami ściany XVIII z wykorzystaniem elementów logiki rozmytej w ujęciu sejsmologicznej oceny jakościowej (rys. 1), oceny ilościowej (rys. 2) oraz oceny wypadkowej, wynikającej z zależności (16).



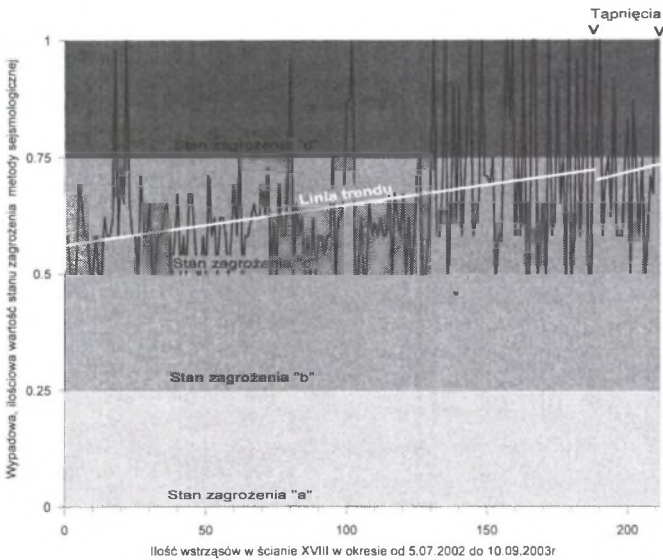
Rys. 1. Sejsmologiczna, jakościowa ocena stanu zagrożenia tapaniami dla ściany XVIII z wykorzystaniem elementów logiki rozmytej

Fig. 1. Seismological, qualitative assessment of rockburst risk level for longwall XVIII, using elements of fuzzy logic



Rys. 2. Sejsmologiczna, ilościowa ocena stanu zagrożenia tąpnięciami dla ściany XVIII z wykorzystaniem elementów logiki rozmytej

Fig. 2. Seismological, quantitative assessment of rockburst risk level for longwall XVIII, using elements of fuzzy logic



Rys. 3. Sejsmologiczna, wypadkowa ocena stanu zagrożenia tąpnięciami dla ściany XVIII z wykorzystaniem elementów logiki rozmytej

Fig. 3. Seismological, resultant assessment of rockburst risk level for longwall XVIII, using elements of fuzzy logic

#### 4. Podsumowanie

Przeprowadzona ocena stanu zagrożenia tapaniami metodą sejsmologiczną, z wykorzystaniem elementów logiki rozmytej na przykładzie rzeczywistej, obserwowanej aktywności sejsmicznej, w trakcie prowadzenia podsadzkowej ściany XVIII w przyspągowej warstwie pokładu 510, wskazuje, że:

- metoda ilościowa oceny stanu zagrożenia tapaniami (rys. 2) w stosunku do metody jakościowej (rys. 1) zaniża w wielu przypadkach wartość funkcji przynależności, a tym samym obniża poziom zagrożenia (w analizowanym przykładzie ze stanu „c” do stanu „b”),
- wykorzystanie elementów teorii zborów rozmytych do sejsmologicznej oceny stanu zagrożenia tapaniami wyrobiska górniczego umożliwia przejście z lingwistycznej oceny stanu zagrożenia typu: stan „a”, „b” itp., do kwantyfikacji zagrożenia w unormowaniu 0-1, co oznacza możliwość ilościowego wartościowania stanu zagrożenia,
- możliwość ilościowego wartościowania stanu zagrożenia pozwala na bieżącą ocenę jego fluktuacji w czasie, a także na określenie jego trendu (wzrostu lub spadku zagrożenia).

#### LITERATURA

1. Zasady i zakres stosowania kompleksowej metody oceny stanu zagrożenia tapaniami w Zakładach Górniczych wydobywających węgiel kamienny. Główny Instytut Górnictwa, Katowice, Seria: Instrukcje, Katowice 1996 r.
2. Zadeh L. A.: Fuzzy sets. Information and Control. Vol. 8 1965 r.

Recenzent: Doc. dr hab. inż. Józef Kabiesz