Piotr BAŃKA, Andrzej JAWORSKI

## PROGNOZA ZAGROŻENIA SEJSMICZNEGO W OPARCIU O ZMIA-NY DEFORMACJI GÓROTWORU WYWOŁANE EKSPLOATACJĄ GÓRNICZĄ

Streszczenie. W artykule przedstawiono sposób prognozowania poziomu zagrożenia sejsmicznego w oparciu o obliczane wartości wskaźników deformacji powodowanych prowadzonymi robotami górniczymi. Na przykładzie wybranego rejonu eksploatacji zaprezentowano wyniki obliczeń prognostycznych. Prognozy te zostały skonfrontowane z zarejestrowanymi wskaźnikami sejsmiczności.

# PREDICTION OF SEISMIC HAZARD BASING ON THE CHANGES OF ROCKMASS DEFORMATION INDUCED BY MINING

Summary. The paper presents the prediction method of seismic hazard basing on the calculated rockmass deformation factors effected by mining works. Results of exemplary calculations carried out for a definite mining region have been presented. The predictions were compared with the recorded seismic factors.

#### 1. Wprowadzenie

Mimo spadku wydobycia, jaki ma miejsce w ostatnich latach, problem ograniczania poziomu zagrożenia sejsmicznego pozostaje nadal bardzo aktualny. Świadczyć o tym mogą przykłady tąpnięć zarejestrowanych w ostatnich latach, jak również występujące wysokoenergetyczne wstrząsy budzące niepokój wśród mieszkańców w rejonach położonych blisko ich epicentrów. Powodem utrzymywania się wysokiego poziomu zagrożenia sejsmicznego jest między innymi konieczność eksploatacji w resztkowych partiach złoża, niejednokrotnie w skomplikowanych warunkach geologiczno-górniczych, jak również fakt prowadzenia eksploatacji na coraz większych głębokościach.

W związku z powyższymi uwarunkowaniami bardzo istotne jest rozwijanie metod prognozy poziomu zagrożenia sejsmicznego. Do bieżącej oceny stanu zagrożenia powszechnie stosowane są metody geofizyczne, takie jak: sejsmoakustyka, sejsmologia górnicza czy metoda sejsmiczna. W przypadku projektowanych robót górniczych ocenę zagrożenia również przeprowadza się metodami geofizycznymi, m.in.: sejsmiczną, mikrograwimetryczną czy geoelektryczną – w przypadku istnienia odpowiedniej sieci wyrobisk górniczych. W przypadku braku odpowiedniej sieci wyrobisk lub zalegania wstrząsogennych warstw skalnych w dużej odległości od istniejących wyrobisk konieczne staje się korzystanie z analitycznych metod oceny stanu zagrożenia. Metody te, rozwijane od wielu lat, pozwalają na coraz dokładniejsze prognozowanie poziomu zagrożenia.

Odpowiednio wcześnie wykonana prognoza kształtowania się zagrożenia sejsmicznego w trakcie prowadzenia projektowanych robót górniczych pozwala na weryfikację projektu pod względem minimalizacji poziomu zagrożenia, jak również na odpowiednie zaprojektowanie środków profilaktyki.

Poprzez prognozę wstrząsu (tąpnięcia) rozumie się podanie czasu, miejsca i energii spodziewanego zjawiska. Oczywiście tak postawione zadanie jest na razie niemożliwe do wykonania. Z drugiej jednak strony, nawet mniej dokładna wiedza o zmianach stanu zagrożenia również może być skutecznie wykorzystywana do ograniczenia jego poziomu, poprzez odpowiednie sterowanie parametrami eksploatacji (zmniejszenie postępu dobowego, wysokości ściany, wzmocnienie obudowy wyrobisk przyścianowych), jak również właściwe (w stosunku do poziomu zagrożenia) stosowanie środków profilaktyki.

W artykule przedstawiono sposób prognozowania sejsmiczności indukowanej prowadzonymi robotami górniczymi w oparciu o zmieniający się stan zdeformowania sztywnych warstw górotworu. Metoda wykorzystuje stwierdzony w trakcie wcześniejszych badań [4,6,7] fakt istnienia silnych zależności korelacyjnych pomiędzy parametrami opisującymi stan zdeformowania ośrodka skalnego a poziomem sejsmiczności indukowanej.

Biorąc pod uwagę fakt, że zdecydowana większość wstrząsów indukowanych występuje w stosunkowo niewielkiej odległości od czynnego frontu ścianowego, w prezentowanej metodzie zrezygnowano z rejonizacji stref zwiększonego zagrożenia sejsmicznego, ograniczając się do analizy zmian jego poziomu w czasie. Podejście takie pozwala na wyeliminowanie błędów określenia współczynników regresji, wynikających z występowania, niejednokrotnie bardzo dużych, niedokładności w procesie lokalizacji ognisk wstrząsów górniczych.

# 2. Prognozowanie sejsmiczności indukowanej w oparciu o deformacje warstw skalnych

Do prognozy zagrożenia sejsmicznego wykorzystano opracowany w trakcie wcześniejszych badań [1,2,3] model regresji liniowej zawierający cztery zmienne niezależne, charakteryzujące stan zdeformowania górotworu. Poziom sejsmiczności indukowanej prowadzonymi robotami górniczymi charakteryzowano podając ilość, sumaryczną energię wstrząsów oraz maksymalną energię wstrząsu, jaka wystąpiła w "i-tym" przedziale czasu.

Przyjęto następujące równanie regresji sejsmiczności względem deformacji:

$$E_{i} = \sum_{j=1}^{4} a_{j} d_{ji} + \varepsilon_{i} \qquad dla \ i = 1...ldt , \qquad (1)$$

gdzie :

 E<sub>i</sub> – ilość, sumaryczna energia lub maksymalna energia wstrząsu – zarejestrowane w przedziale czasu dt,

- d<sub>j</sub> - wartość "j"-tego wskaźnika deformacji,

- ldt - liczba przedziałów czasu, dla których wyznaczane są parametry modelu regresji,

- a - parametry modelu regresji,

-ε-składnik losowy.

Po przeprowadzeniu estymacji współczynników regresji, w oparciu o dane sejsmologiczne zarejestrowane w trakcie prowadzenia dotychczasowej eksploatacji w danym rejonie oraz obliczone wartości wskaźników deformacji, możliwa jest prognoza zagrożenia sejsmicznego projektowanych robót górniczych.

Z uwagi na pominięcie w modelu regresji zmiennych uwzględniających parametry wytrzymałościowe skał budujących górotwór (jak również wzajemne relacje tych parametrów) oraz dane o występujących zaburzeniach geologicznych, metoda ma tzw. charakter porównawczy (typowy dla analitycznych metod prognozowania). Oznacza to, że jeżeli dla danego rejonu eksploatacji (partii złoża, ograniczonej zaburzeniami tektonicznymi, o wymiarach upoważniających do przyjęcia tezy, że parametry wytrzymałościowe warstw skalnych są stałe), zostaną estymowane parametry modelu regresji sejsmiczności względem stanu deformacji, to predykcję na ich podstawie można realizować tylko dla tego samego rejonu.

Charakteryzując poziom sejsmiczności indukowanej prowadzonymi robotami górniczymi poprzez obliczanie liczby i sumarycznej energii wstrząsów zarejestrowanych w jednostkowym przedziale czasu, należy zdawać sobie sprawę z faktu, że zgodnie z zależnością Gutenberga-Richtera są to wielkości związane ze sobą funkcyjnie.

Przyjmując następującą postać rozkładu Gutenberga-Richtera

$$\log n = a - bm, \tag{2}$$

gdzie :

- n - liczba wstrząsów o magnitudzie równej lub większej od m.,

- m - magnituda,

- a,b - parametry,

oraz związek pomiędzy energią a magnitudą (np.[5])

$$\log E = c + dm, \tag{3}$$

gdzie :

- E - energia sejsmiczna wstrząsu,

- c,d - parametry,

otrzymamy

$$\log n = a_1 - b_1 \log E \tag{4}$$

gdzie :

$$\mathbf{a}_{\mathbf{l}} = \mathbf{a} + \mathbf{b}\mathbf{c}/\mathbf{d} \tag{5}$$

$$\mathbf{b}_1 = \mathbf{b}/\mathbf{d} \tag{6}$$

Sumaryczna energia wydzielona w jednostkowym przedziale czasu wynosi:

$$E_{c} = \int_{E_{min}}^{E_{max}} n \, dE \tag{7}$$

z (4) otrzymujemy

$$n = \frac{10^{a_1}}{E^{b_1}}$$
(8)

czyli

$$E_{c} = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \frac{10^{a_{1}}}{B_{1}} dE = \frac{10^{a_{1}}}{1 - b_{1}} E^{1 - b_{1}} \left| \frac{E_{max}}{E_{min}} \right| = \frac{10^{a_{1}}}{1 - b_{1}} \left( E_{max}^{1 - b_{1}} - E_{min}^{1 - b_{1}} \right)$$
(9)

z kolei z (8)

$$\mathbf{n}_{c} = \frac{10^{a_{1}}}{\mathbf{E}_{\min}^{b_{1}}} \tag{10}$$

uwzględniając (10) w (9) otrzymamy:

$$\mathbf{E}_{c} = -\frac{\mathbf{n}_{c} \mathbf{E}_{\min}^{b_{1}}}{1 - \mathbf{b}_{1}} \left( \mathbf{E}_{\max}^{1 - \mathbf{b}_{1}} - \mathbf{E}_{\min}^{1 - \mathbf{b}_{1}} \right)$$
(11)

Z zależności (11) wynika, że sumaryczna energia wstrząsów zarejestrowanych w danym przedziale czasu ( $E_c$ ) oraz ich liczba ( $n_c$ ) są wielkościami proporcjonalnymi.

Powyższa zależność może zostać wykorzystana do prognozy maksymalnych energii sejsmicznych wstrząsów. Po przekształceniu (11) otrzymamy

$$E_{max} = \left(\frac{E_{c}(1-b_{1})}{n_{c}E_{min}^{b_{1}}} + E_{min}^{1-b_{1}}\right)^{\frac{1}{1-b_{1}}}$$
(12)

Zakładając, że znamy  $E_c$ ,  $n_c$  - prognozowaną sumaryczną energię i liczbę wstrząsów w jednostkowym przedziale czasu,  $E_{min}$  - minimalną energię sejsmiczną wstrząsów, powyżej której spełniony jest rozkład Gutenberga-Richtera, b<sub>1</sub> - parametr rozkładu G.R., możliwa jest prognoza  $E_{max}$ .

### 3. Przykład prognozy zagrożenia sejsmicznego

Poniżej przedstawiona została prognoza zagrożenia sejsmicznego w partii R KWK Anna. Do analizy wybrano rejon ścian R-9, R-10 prowadzonych w pokładzie 629/2. Pokład 629/2 o grubości około 1,8m, nachyleniu 8 stopni zalega na głębokości około 900 metrów. W polu analizowanych ścian występowały krawędzie eksploatacji dokonanej :

- w pokładzie 629/1 zalegającym w odległości około 30 metrów powyżej,
- w pokładzie 626/2 zalegającym w odległości około 130 metrów powyżej,

W stropie pokładu zalega kilka kompleksów mocnych warstw piaskowców, m.in.:

- 20 metrowa warstwa piaskowca w odległości około 4 metrów,
- 70 metrowa warstwa piaskowca w odległości około 60 metrów.

W poniższej tabeli przedstawiono kształtowanie się zarejestrowanej sejsmiczności w poszczególnych klasach energetycznych i sumarycznej.

Tablica 1

Energia [J]	Ilość wstrząsów	Suma eng [J]
10 <sup>2</sup>	356	$2.4 \times 10^5$
10 <sup>3</sup>	757	$2.4 \times 10^6$
104	126	4.9x10 <sup>6</sup>
105	22	8.5x10 <sup>6</sup>
106	3	3x10 <sup>6</sup>
107	-	-
RAZEM	1264	1.9x10 <sup>7</sup>

Zarejestrowana liczba i sumaryczna energia wstrząsów w rejonie ścian R-9, R-10 w okresie 15.11.96 r. do 1.04.98 r.

Na rysunku 1 przedstawiono wydruk konturów eksploatacji w pokładzie 629/2 z naniesionymi ogniskami zarejestrowanych wstrząsów oraz zarysem eksploatacji dokonanej w pokładzie 629/1.



Rys. 1. Kontury eksploatacji w pokładzie 629/2 KWK Anna z naniesionymi ogniskami zarejestrowanych wstrząsów

Fig. 1. Mining contours in bed 629/2 of Coal Mine 'Anna' with marked focuses of recorded tremors

Korzystając z danych o zarejestrowanej w rejonie ścian R-9 i R-10 sejsmiczności sporządzono histogram rozkładu energetycznego oraz przebieg teoretycznej częstości (rozkład Gutenberga-Richtera) przedstawione na rys 2.



Rys. 2. Wykres powtarzalności oraz przebieg teoretycznej częstości wstrząsów indukowanych w rejonie ścian R-9, R-10



Jak wynika z przeprowadzonej analizy, wstrząsy spełniają rozkład G.-R. począwszy od energii 1x10<sup>3</sup> J.

Okres prowadzenia ścian podzielono na dwa przedziały:

- 1.11.1996 r. do 1.07.1997 r. okres estymacji parametrów w tym czasie prowadzono eksploatację w polu ściany R-9,
- 1.07.1997 r. do 1.04.1998 r. okres prognozy w oparciu o wyznaczone współczynniki regresji – w tym czasie prowadzono eksploatację w polu ściany R-10.

Na rysunkach 3,4 i 5 zaprezentowano wyniki prognozy. Na poniższych wydrukach linią ciągłą przedstawiono obserwowany przebieg zmian sejsmiczności, natomiast wykresy słupkowe ilustrują wartości przewidywane (dla okresu pierwszego) i prognozowane (dla drugiego okresu):

- ilości wstrząsów rys.3,
- sumy energii wstrząsów rys.4,
- maksymalnych energii wstrząsów rys.5,

w przedziałach czasu Δti wynoszących 7 dni.



Rys. 3. Rozkład obserwowanej i przewidywanej (prognozowanej) ilości wstrząsów indukowanych w rejonie ścian R-9, R-10

Fig. 3. Distribution of the observed and predicted number of tremors induced in the area of longwalls R-9, R-10



- Rys. 4. Rozkład obserwowanej i przewidywanej (prognozowanej) sumy energii wstrząsów [J] indukowanych w rejonie ścian R-9, R-10
- Fig. 4. Distribution of the observed and predicted summary energy of tremors [J] induced in the area of longwalls R-9, R-10



- Rys. 5. Rozkład obserwowanych i przewidywanych (prognozowanych) maksymalnych energii wstrząsów [J] indukowanych w rejonie ścian R-9, R-10
- Fig. 5. Distribution of the observed and predicted maximum energy of tremors [J] induced in the area of longwalls R-9, R-10

Z kolei na rysunku 6 przedstawiono prognozę maksymalnych energii wstrząsów wykonaną w oparciu o zależność 12.



- Rys. 6. Rozkład prognozowanych maksymalnych energii wstrząsów [J] wg zależności (12) indukowanych w rejonie ściany R-10
- Fig. 6. Distribution of the predicted by means of equation (12) maximum energy of tremors [J] induced in the area of longwall R-10

Uzyskana duża zgodność wyników pomiędzy wartościami obserwowanymi a prognozowanymi upoważnia do wykonania przy wykorzystaniu wyznaczonych równań regresji prognoz zagrożenia sejsmicznego dla kolejnych wybrań projektowanych w przedmiotowym rejonie eksploatacyjnym.

### 4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono metodę prognozowania zagrożenia sejsmicznego w oparciu o deformacje górotworu wywołane eksploatacją górniczą. Opracowana metoda pozwala na predykcję, w oparciu o wyznaczone równania regresji, ilości, sumy energii oraz maksymalnych energii wstrząsów, indukowanych projektowaną eksploatacją górniczą.

Może ona być stosowana jako uzupełnienie geofizycznych metod oceny stanu zagrożenia sejsmicznego. Na podkreślenie zasługuje fakt, że opracowana metoda może być również stosowana tam, gdzie z uwagi na brak wyrobisk nie jest możliwe przeprowadzenie badań geofizycznych.

### LITERATURA

- Bańka P.: Wpływ deformacji górotworu na czasowe zmiany aktywności sejsmicznej. ZN Pol.Śl.s.Górnictwo z.232, Gliwice 1996.
- Bańka P., Jaworski A. : Prognozowanie czasowych zmian sejsmiczności w oparciu o deformacje górotworu wywołane eksploatacją górniczą. ZN Pol.Śl., s.Górnictwo z.236, Gliwice 1997.
- Bańka P., Jaworski A. : Wpływ deformacji górotworu na maksymalne energie zjawisk sejsmicznych indukowanych eksploatacją górniczą. ZN Pol.Śl.s.Górnictwo z.239, Gliwice 1999.
- 4. Drzęźla B., Białek J., Jaworski A., Bańka P., Kołodziejczyk P.: Badanie związków sejsmiczności indukowanej eksploatacją górniczą z parametrami opisującymi deformacje ośrodka skalnego. Sprawozdanie końcowe z realizacji projektu badawczego KBN nr 903759101. Gliwice 1994, praca niepublikowana.
- Dubiński J., Wierzchowska Z. : Metody obliczania energii wstrząsów górotworu na Górnym Śląsku. Prace GIG, Komunikat nr 591, Katowice 1973.
- Jaworski A. : Związek pomiędzy deformacją górotworu a wydatkiem energetycznym wstrząsów górniczych z rejonu kopalń Bobrek i Miechowice. ZN Pol.Śl., s.Górnictwo z.225, Gliwice 1995.
- 7. Jaworski A.: Relationship between rock mass deformation and energy release of interdependent mining tremors in the area of Bytom Basin. Acta Montana No 9, 1996.

Recenzent: Prof.dr hab.inż. Józef Dubiński

#### Abstract

The paper presents the prediction method of seismicity changes in time induced by the carried out mining process. The prediction is carried out basing on the linear regression model of seismicity with respect to deformation of rigid rock layer.

Deformation changes taking place as a result of the completed and present mining process have been described by means of deformation factors, which are derivatives of vertical movement of the rock mass, i.e. vertical strain and dip. Positive and negative increments of the above factors have been investigated separately. The seismic activity taking place in the course of mining works have been described using three factors: number of tremors per week, total energy and maximum energy of the recorded tremors per week.

The worked out model of linear regression has been used for the description of recorded seismic activity in the selected area of the Anna coal mine heavily troubled by tremors.

As a result of the calculations, it has been ascertained that the real run of seismicity correspond with the run calculated by means of the worked out regression model.