

Piotr BAŃKA, Andrzej JAWORSKI, Jan BIAŁEK  
Politechnika Śląska, Gliwice

## OPIS SEJSMICZNOŚCI W OPARCIU O ZMIANY DEFORMACJI GÓROTWORU POWODOWANE EKSPLOATACJĄ

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań wiążących poziom sejsmiczności ze stanem deformacyjno-energetycznym górotworu naruszanego dokonaną oraz prowadzoną eksploatacją. Zamieszczono wyniki przykładowych obliczeń wykonanych dla konkretnego rejonu eksploatacji prowadzonej w KWK Marcel.

## THE DESCRIPTION OF SEISMICITY BASING ON THE CHANGES OF ROCKMASS DEFORMATION EFFECTED BY MINING

**Summary.** The paper presents the results of investigation studies linking the level of seismicity with the deformation-and-energy state of rockmass damaged by the completed mining and ongoing mining. Results of exemplary calculations carried out for a definite mining region of Coal Mine 'Marcel' have been presented.

### 1. Wstęp

Prowadzone przez kilkadziesiąt lat obserwacje zjawisk sejsmicznych rejestrowanych w kopalniach GZW pozwoliły na wyróżnienie w zbiorze rejestrowanych wstrząsów dwóch podzbiorów:

- bardzo licznych wstrząsów, związanych bezpośrednio z prowadzonymi robotami górnictwymi. Ogniska tych wstrząsów przemieszczają się wraz z postępem frontów ścianowych oraz przodków drążonych wyrobisk korytarzowych, liczba wstrząsów jest silnie zależna od parametrów prowadzonych robót górnictwowych, jak również od lokalnych warunków geologicznych. Energia tych zjawisk jest na ogół mniejsza od energii wstrząsów z drugiego, scharakteryzowanego poniżej podzbioru;

- stosunkowo nielicznych wstrząsów o dużych energiach, słabiej związanych z aktualnie prowadzonymi robotami górniczymi. Występują one niejednokrotnie w dużej odległości od wyrobisk górniczych. Z reguły wstrząsy te są silnie odczuwane na powierzchni. Zjawiska te mają charakter bardziej regionalny. Z uwagi na małą liczbę tych wstrząsów, są one gorzej poznane niż wymienione wcześniej.

Bezspreczynny związek wstrząsów z niskoenergetycznej mody rozkładu energetycznego wstrząsów z prowadzonymi robotami górniczymi był asumptem do podjęcia szeregu prac badawczych mających na celu ustalenie zależności pomiędzy parametrami prowadzonej eksploatacji a towarzyszącą jej aktywnością sejsmiczną. Poprzez parametry prowadzonej eksploatacji rozumieć należy szereg czynników, takich jak: głębokość eksploatacji, wysokość furty eksploatacyjnej, sposób likwidacji zrobów, prędkość postępu frontu, długość ściany, powierzchnia wyeksploatowanego złoża, występowanie zaszłości eksploatacyjnych w eksploatowanym pokładzie i w pokładach sąsiednich itp.

O poziomie rejestrowanej aktywności sejsmicznej indukowanej prowadzonymi robotami górniczymi mogą więc decydować procesy deformacyjne zachodzące w górotworze. Deformacje górotworu są bowiem zależne od parametrów prowadzonej eksploatacji.

Na możliwość uwzględnienia wskaźników opisujących procesy deformacji wstrząsogennych warstw górotworu i powierzchni terenu do charakteryzowania poziomu sejsmiczności indukowanej wskazywało szereg autorów.

W pracy [4] J.Białek i A.Jaworski zaproponowali wykorzystanie prognozowanych rozkładów wybranych wskaźników dynamicznej niecki osiadania warstw górotworu do prognozy sumarycznego wydatku energetycznego wstrząsów indukowanych prowadzoną i projektowaną eksploatacją górniczą. Metoda ta jest stale rozwijana (B.Drzęźła i in. [9]), umożliwiając coraz dokładniejszą prognozę stref zagrożonych sejsmicznie. Badania prowadzone są w dwóch kierunkach: poszukiwane są zależności pomiędzy przestrzennymi rozkładami deformacji i sejsmiczności [5-11], jak również, w drugim podejściu – analizowane są zależności procesów deformacyjnych i sejsmiczności określonych w funkcji czasu [1,2,3].

## 2. Stan zdeformowania mocnych warstw skalnych a wydatek energetyczny wstrząsów indukowanych eksploatacją górnictw

Sposób prognozowania w płaszczyźnie pokładu lub w określonej warstwie skalnej rozkładu liczby wstrząsów [ $1/m^2$ ] oraz gęstości energii sejsmicznej [ $J/m^2$ ,  $J/m^3$ ] został przedstawiony w pracach [4,5]. Przedstawiono tam także rozkłady wartości obserwowanych i przewidywanych powyższych wskaźników w formie planu warstwicowego, uwidaczniającego położenie obszarów silniej zagrożonych sejsmicznie względem rozpatrywanych wyrobisk górnictw.

Stan zdeformowania górotworu opisywano przy pomocy wskaźników będących pochodnymi przemieszczeń pionowych, obliczonych wzorami teorii Budryka-Knotheo, tj. nachyleń i odkształceń pionowych. Wskaźniki charakteryzujące ruchy poziome pominięto z uwagi na fakt, że prognozowane są one z dużo większymi błędami w porównaniu do ruchów pionowych. Wzory teorii Budryka-Knotheo zostały odpowiednio zmodyfikowane, tak by można prognozować ruchy sztywnych warstw skalnych górotworu zarówno pod, jak i nad eksploatowanym pokładem.

Z uwagi na konieczność uwzględnienia zarówno deformacji wywołanych eksploatacją dokonaną, jak i aktualnie prowadzoną, wskaźniki stanu zdeformowania warstw skalnych zostały zdefiniowane jako iloczyn wartości wskaźnika wywołanej wpływami eksploatacji dokonanej i przyrostu wartości danego wskaźnika wywołanego wpływami aktualnie prowadzonej eksploatacji.

Zdeformowanie wytrzymałych warstw skalnych obliczano następująco:

$$wd1_l = \int_{t_1}^{t_2} \left( T_{x1} \frac{dT_{x1}}{dt} + T_{y1} \frac{dT_{y1}}{dt} \right) dt \quad (1)$$

$$wd2_l = \int_{t_1}^{t_2} \left( \varepsilon_{z1} \frac{d\varepsilon_{z1}}{dt} \right) dt \quad (2)$$

gdzie :

- $wd1_l$  - wskaźnik zdeformowania warstwy skalnej w „l-tym” punkcie obliczeniowym, zależny od nachyleń profilu niecki obniżeniowej,
- $wd2_l$  - wskaźnik zdeformowania warstwy skalnej w „l-tym” punkcie obliczeniowym, zależny od odkształceń pionowych,
- $T_{x1}, T_{y1}$  - nachylenia profilu niecki obliczone w kierunkach osi X i Y w „l-tym” punkcie,
- $\varepsilon_{z1}$  - odkształcenia pionowe w „l-tym” punkcie.

Wskaźniki wd1 i wd2 mogą przyjmować zarówno dodatnie, jak i ujemne wartości. Analiza lokalizacji rejestrowanych wstrząsów towarzyszących prowadzonym wyrobiskom ścianowym wykazuje, że występują one zarówno przed, jak i za czołem ściany. Oba procesy zachodzą z różną intensywnością, zależną od sposobu kierowania stropem oraz warunków geologiczno-górnicznych, w jakich prowadzona jest eksploatacja. Z powyższego względu zdecydowano się na osobne traktowanie dodatnich, jak i ujemnych przyrostów wskaźników wd1 i wd2.

Tak więc, deformacje wstrząsogennych warstw skalnych charakteryzowano czterema wskaźnikami, zdefiniowanymi w poniżej przedstawiony sposób:

$$d_{kl} = \int_{t_1}^{t_2} f_k dt \quad \text{dla } k = 1, \dots, 4$$

gdzie funkcje  $f_1$  do  $f_4$  zostały zdefiniowane następująco:

$$\begin{aligned}
 f_1 &= T_{x1} \frac{dT_{x1}}{dt} + T_{y1} \frac{dT_{y1}}{dt} & \text{dla } T_{x1} \frac{dT_{x1}}{dt} + T_{y1} \frac{dT_{y1}}{dt} > 0 \\
 f_1 &= 0 & \text{dla } T_{x1} \frac{dT_{x1}}{dt} + T_{y1} \frac{dT_{y1}}{dt} \leq 0 \\
 f_2 &= T_{x1} \frac{dT_{x1}}{dt} + T_{y1} \frac{dT_{y1}}{dt} & \text{dla } T_{x1} \frac{dT_{x1}}{dt} + T_{y1} \frac{dT_{y1}}{dt} < 0 \\
 f_2 &= 0 & \text{dla } T_{x1} \frac{dT_{x1}}{dt} + T_{y1} \frac{dT_{y1}}{dt} \geq 0 \\
 f_3 &= \varepsilon_{z1} \frac{d\varepsilon_{z1}}{dt} & \text{dla } \varepsilon_{z1} \frac{d\varepsilon_{z1}}{dt} > 0 \text{ i } \varepsilon_{z1} < 0 \\
 f_3 &= 0 & \text{dla } \varepsilon_{z1} \frac{d\varepsilon_{z1}}{dt} \leq 0 \\
 f_4 &= \varepsilon_{z1} \frac{d\varepsilon_{z1}}{dt} & \text{dla } \varepsilon_{z1} \frac{d\varepsilon_{z1}}{dt} < 0 \text{ i } \varepsilon_{z1} < 0 \\
 f_4 &= 0 & \text{dla } \varepsilon_{z1} \frac{d\varepsilon_{z1}}{dt} \geq 0
 \end{aligned} \tag{3}$$

Warunek  $\varepsilon_{z1} < 0$  wynika z doświadczeń zdobytych w trakcie prowadzenia eksploatacji w rejonach odprężonych. Tam gdzie eksploatacja dokonana spowodowała odprężenie

eksploatowanej partii pokładu ( $\epsilon_{z1} > 0$ ), obserwuje się zasadniczy spadek sejsmiczności indukowanej prowadzonymi robotami górniczymi.

Wydatek energetyczny, jak również ilość wstrząsów, indukowanych eksploatacją opisywano korzystając z następującego liniowego modelu regresji:

- w przypadku wyznaczania stref zagrożonych sejsmicznie

$$E_{\varphi}(x, y, z = \text{const.}, t_1, t_2) = a_1 d_1 + a_2 d_2 + a_3 d_3 + a_4 d_4 \quad (4)$$

gdzie:

- $E_{\varphi}$  - obliczany na podstawie zmian odkształceń pionowych i nachyleń wydatek energetyczny (liczebność) wstrząsów w punkcie górotworu o współrzędnych  $x, y, z$  w przedziale czasu  $\Delta T = t_2 - t_1$ ,

- natomiast w przypadku analizy rozkładu sejsmiczności w czasie

$$E_{\varphi}(\Delta t_i) = s_j \sum_{i=1}^{lpkt} (a_1 d_{1i} + a_2 d_{2i} + a_3 d_{3i} + a_4 d_{4i}) \quad (5)$$

gdzie:

- $E_{\varphi}$  - obliczany na podstawie zmian odkształceń pionowych i nachyleń wydatek energetyczny w górotworze w przedziale czasu  $\Delta t_i = \Delta T/n$ ,
- $n$  - liczba jednostkowych przedziałów czasu,
- $lpkt$  - liczba punktów obliczeniowych,
- $s_j$  - pole jednostkowe, równe iloczynowi modułów siatki punktów obliczeniowych wzdłuż osi X i Y.

Niejednokrotnie o poziomie rejestrowanej sejsmiczności decydują procesy deformacyjne zachodzące w szeregu wytrzymałych warstwach skalnych, które zalegając nad, a także pod wybieranymi pokładami obejmowane są wpływami rozpatrywanej eksploatacji. W tych przypadkach, korzystając ze wzorów (4) i (5) dla pojedynczej warstwy - sumaryczną liczbę (energię) wstrząsów wydzielaną ze wszystkich rozpatrywanych  $m$  - warstw  $E_{\varphi c}$  można wyrazić zależnością:

$$E_{\varphi c} = \sum_{k=1}^m E_{\varphi k} \quad (6)$$

### 3. Opis sejsmiczności dla wybranego rejonu eksploatacji

Poniżej przedstawiono przykład możliwości zastosowania opracowanej metody do opisu czasoprzestrzennych zmian sejsmiczności indukowanej eksploatacją górniczą.

Do analizy wybrano rejon ścian M-4 - M-6 prowadzonych w pokładzie 703/1-2 w KWK Marcel.

Pokład 703/1-2 wykształcony jest jako jednolita ława węgla bez przerostów. Miąższość pokładu wynosi około 2.5 metra. Nachylenie wynosi około 5 stopni, głębokość zalegania około 900 metrów. Strop pokładu zbudowany jest z warstwy łupku piaszczystego o grubości 4.3 m i piaskowca o grubości 18.3 m. W odległości około 200 metrów występuje warstwa piaskowca drobno-i średnioziarnistego o grubości około 70 metrów.

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

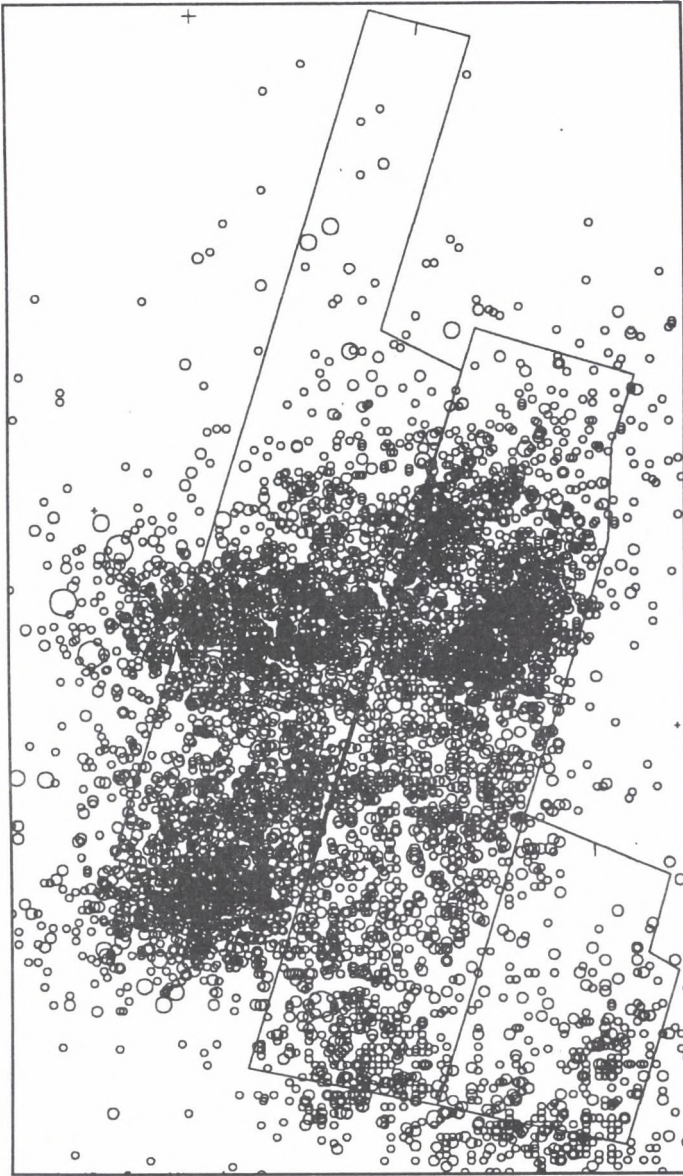
Tablica 1

Zarejestrowana liczba i sumaryczna energia  
wstrząsów w rejonie ścian M-4 - M-6 w okresie  
1.05.93 r. do 1.07.98 r.

Energia [J]	Ilość wstrząsów	Suma eng [J]
$10^2$	12	$6,8 \times 10^3$
$10^3$	4187	$1,6 \times 10^7$
$10^4$	1903	$7,3 \times 10^7$
$10^5$	86	$3,5 \times 10^7$
$10^6$	12	$3,7 \times 10^7$
$10^7$	-	-
RAZEM	6200	$1,6 \times 10^8$

Na rysunku 1 przedstawiono wydruk konturów eksploatacji w pokładzie 703/1-2 z naniesionymi ogniskami zarejestrowanych wstrząsów.

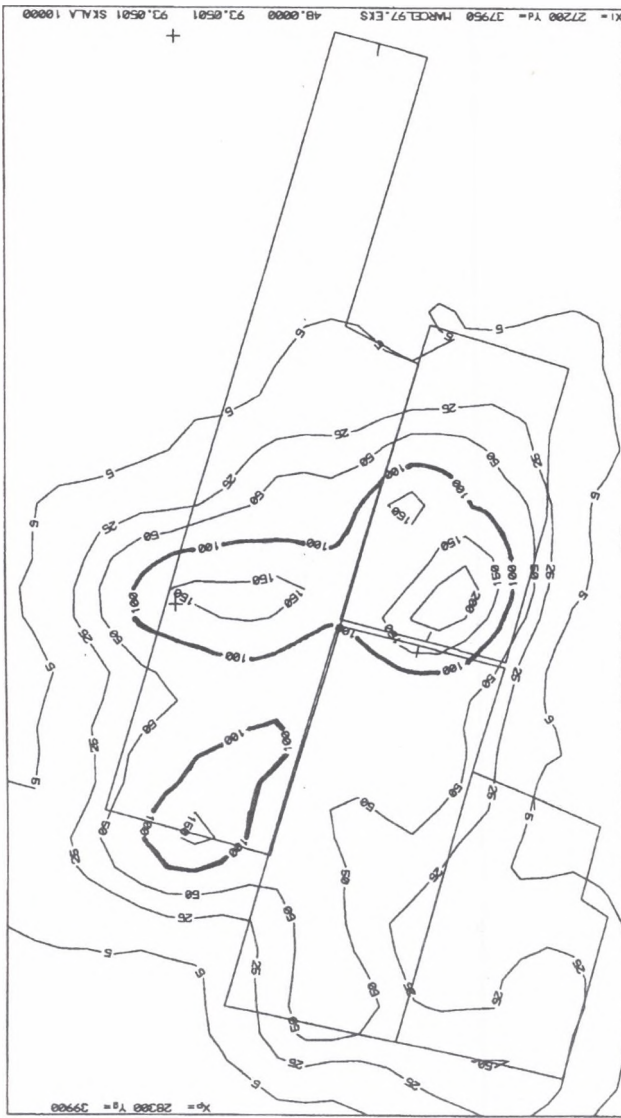




Rys. 1. Kontury eksploatacji w pokładzie 703/1-2 KWK Marcel z naniesionymi ogniskami zarejestrowanych wstrząsów

Fig. 1. Mining contours in bed 703/1-2 of Coal Mine 'Marcel' with marked focuses of recorded tremors

Korzystając z danych o zarejestrowanej sejsmiczności, sporządzono rozkład (plan warstwiczny) rzeczywistych wartości ilości wstrząsów zarejestrowanych w rejonie ścian M-4 - M-6 - Ew, [1/10000m<sup>2</sup>]. Rozkład ten przedstawiono na rys 2.

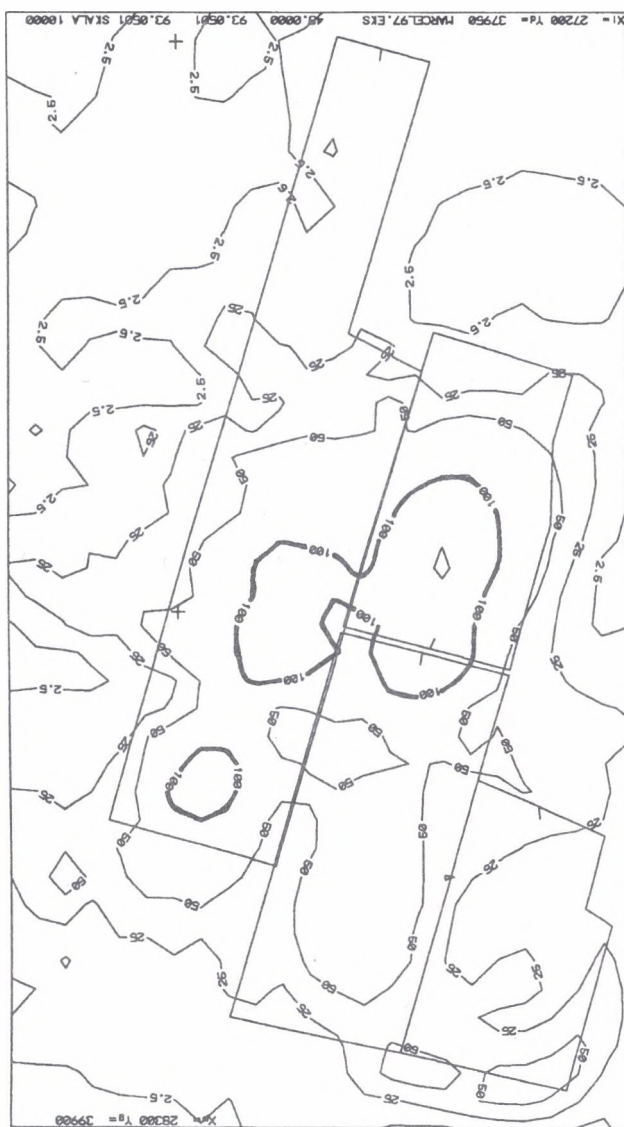


Rys. 2. Rozkład obserwowanej ilości wstrząsów indukowanych w rejonie ścian M-4 - M-6.

Fig. 2. Distribution of observed number of tremors induced in the area of longwalls M-4 - M-6.

Rozkład (plan warstwiczny) przewidywanych porównawczo w oparciu o zależność (4) wartości liczebności wstrząsów  $E_{\varphi}$  przedstawia rys. 3.





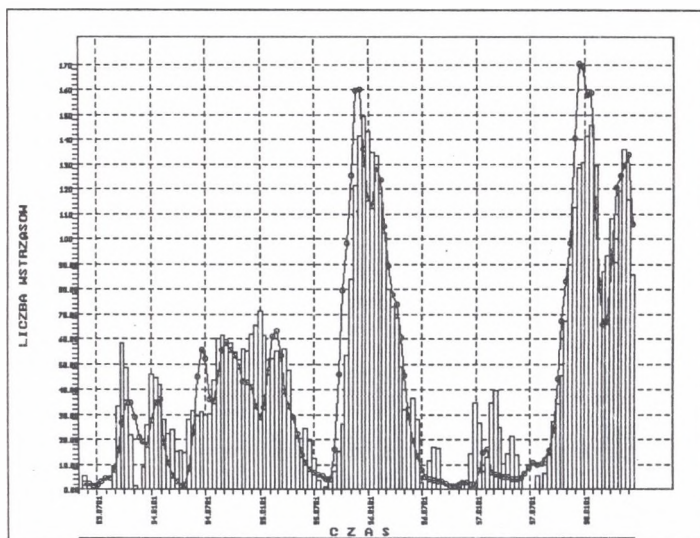
Rys. 3. Rozkład przewidywanej za pomocą wzoru (4) ilości wstrząsów indukowanych w rejonie ścian M-4 - M-6

Fig. 3. Distribution of number of tremors induced in the area of longwalls M-4 - M-6 predicted basing on the equation (4)

Natomiast na rysunkach 4 i 5 przedstawiono wyniki analizy sejsmiczności w funkcji czasu. Na wydrukach linią ciągłą przedstawiono obserwowany przebieg zmian sejsmiczności, natomiast wykresy słupkowe ilustrują przewidywane za pomocą wzoru (5):

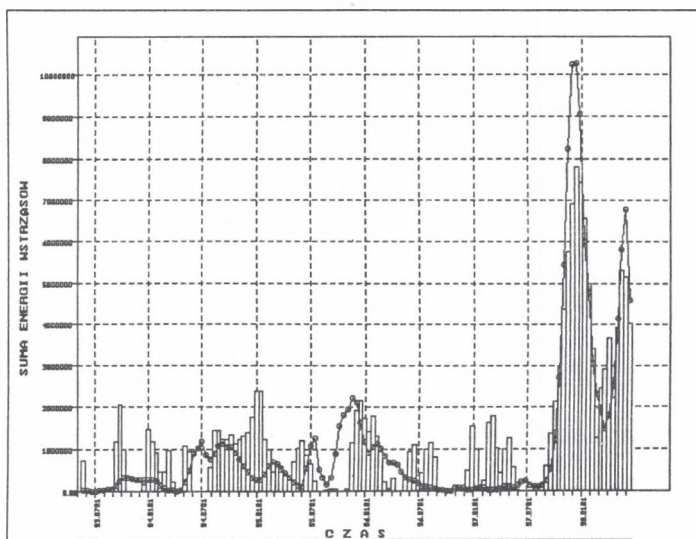
- liczbę wstrząsów - rys.4,

- sumę energii wstrząsów - rys.5,  
w przedziałach czasu  $\Delta t_i$  wynoszących 7 dni.



Rys. 4. Rozkład obserwowanej i przewidywanej za pomocą wzoru (4) liczby wstrząsów indukowanych w rejonie ścian M-4 - M-6

Fig. 4. Distribution of the observed and predicted by means of equation (4) number of tremors induced in the area of longwalls M-4 - M-6



Rys. 5. Rozkład obserwowanej i przewidywanej za pomocą wzoru (4) sumy energii wstrząsów [J] indukowanych w rejonie ścian M-4 - M-6

Fig. 5. Distribution of the observed and predicted by means of equation (4) summary energy of tremors [J] induced in the area of longwalls M-4 - M-6

Uzyskana duża zgodność wyników pomiędzy wartościami obserwowanymi a przewidywanymi upoważnia do wykonania przy wykorzystaniu zależności (4) i (5) prognoz wyprzedzających rozkładu wydatku energetycznego, a także liczebności wstrząsów dla kolejnych wybrań projektowanych w przedmiotowym rejonie eksploatacyjnym.

#### 4. Podsumowanie

Przedstawiona metoda pozwala na prognozowanie, w oparciu o wyznaczone równania regresji, wydatku energetycznego i ilości wstrząsów, indukowanych projektowaną eksploatacją górnictwem.

Może ona być stosowana jako uzupełnienie geofizycznych metod oceny stanu zagrożenia sejsmicznego, szczególnie tam, gdzie z uwagi na brak wyrobisk nie jest możliwe przeprowadzenie badań geofizycznych.

Pewnym ograniczeniem opisanej metody prognozy zagrożenia, jest fakt, że nie można jej stosować w przypadku rejonów, w których eksploatacja się dopiero rozpoczyna, lub w rejonach, w których liczba zarejestrowanych zjawisk sejsmicznych jest mała.

#### LITERATURA

1. Bańka P.: Wpływ deformacji górotworu na czasowe zmiany aktywności sejsmicznej. ZN Pol.Śl.s.Górnictwo z.232, Gliwice 1996.
2. Bańka P., Jaworski A.: Prognozowanie czasowych zmian sejsmiczności w oparciu o deformacje górotworu wywołane eksploatacją górnictwem. ZN Pol.Śl., s.Górnictwo z.236, Gliwice 1997.
3. Bańka P., Jaworski A.: Wpływ deformacji górotworu na maksymalne energie zjawisk sejsmicznych indukowanych eksploatacją górnictwem. ZN Pol.Śl., s.Górnictwo z.239, Gliwice 1999.
4. Białek J., Jaworski A.: Sposób wyznaczania stref zagrożonych wzmożoną aktywnością sejsmiczną na podstawie prognozowanych rozkładów wskaźników deformacji górotworu. Materiały seminarium: Ocena stanu zagrożenia tąpnięciami w kopalniach KGW i środki ich minimalizacji. ST KG PAN o.Katowice, KGW, GIG, Jaworze 1989.
5. Białek J., Jaworski A.: Próba oceny aktywności sejsmicznej na podstawie prognozowanych stanów deformacyjnych górotworu. ZN AGH, s.Górnictwo z.142, Kraków 1989.
6. Białek J., Drzęzła B., Jaworski A.: Próba ustalenia zależności funkcyjnych pomiędzy przebiegiem deformacji górotworu w czasie a energią sejsmiczną dla warunków KWK Rydułtowy. Publ.Inst.Geophys.Pol.Acad.Sc.M-16 (245), Warszawa 1992.
7. Drzęzła B., Białek J., Jaworski A.: Prognozowanie stanów deformacyjno-energetycznych górotworu dla oceny jego sejsmiczności metodą porównawczą.

- Mat.Konf.nt. Nowoczesne metody oceny stanu zagrożenia i zwalczania tąpnięć. GIG, Katowice 1988.
8. Drzęzła B., Białek J., Jaworski A.: Prognozowanie metodą analityczną sejsmiczności indukowanej wielopokładową eksploatacją. Mat.Konf. nt. Tematyka bezpieczeństwa pracy w górnictwie w Grantach KBN, GIG, Rudy Raciborskie 1993.
  9. Drzęzła 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.
  10. 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.
  11. 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 results of investigation studies linking the level of seismicity with the deformation-and-energy state of rockmass damaged by the completed mining and ongoing mining. The prediction is carried out basing on the linear regression model of seismicity with respect to deformation of rigid rock layers.

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 worked out model of linear regression has been used for the description of recorded seismicity in the selected area of the Marcel coal mine.