

Piotr BAŃKA, Andrzej JAWORSKI

## **PROGNOZOWANIE CZASOWYCH ZMIAN SEJSMICZNOŚCI W OPARCIU O DEFORMACJE GÓROTWORU WYWOŁANE EKSPLOATACJĄ GÓRNICZĄ**

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono metodę prognozowania czasowych zmian sejsmiczności indukowanej prowadzonymi robotami górniczymi. Prognoza jest wykonywana w oparciu o model regresji liniowej sejsmiczności względem deformacji sztywnych warstw skalnych.

## **PREDICTION OF SEISMICITY CHANGES IN TIME BASING ON ROCKMASS DEFORMATIONS EFFECTED BY MINING**

**Summary.** 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 layers.

### **1. Wstęp**

Zagrożenie wstrząsami i tapaniami należy do najgroźniejszych zagrożeń naturalnych w polskim górnictwie węglowym. Zagrożenie to narasta między innymi z uwagi na konieczność eksploatacji w resztkowych partiach złoża, niejednokrotnie w skomplikowanych warunkach geologiczno-górnictwowych, jak również z powodu prowadzenia eksploatacji na coraz większych głębokościach. W związku z powyższym bardzo istotne jest rozwijanie metod oceny potencjalnego stanu zagrożenia tapaniami.

Prowadzone od wielu lat badania sejsmiczności indukowanej prowadzonymi robotami górniczymi wykazały, że istnieją zależności korelacyjne pomiędzy procesami deformacyjnymi w górotworze, zachodzącymi wskutek prowadzenia eksploatacji a rejestrowaną ilością i

energiją sejsmiczną wstrząsów (Drzęźła B. i in.[9], Białek J. i in.[2,3,4], Jaworski A. [10], Bańka P. [1]).

W artykule przedstawiono wyniki badań, mających na celu stwierdzenie, czy w oparciu o wyznaczone dla danego rejonu eksploatacji równanie regresji pomiędzy wskaźnikami charakteryzującymi sejsmiczność oraz stan zdeformowania wytrzymałych warstw skalnych możliwa jest prognoza poziomu zagrożenia sejsmicznego dla dalszych robót górniczych w tym rejonie.

Zarówno zmiany sejsmiczności, jak i procesy deformacyjne analizowano w funkcji czasu. Podejście takie (rezygnacja z lokalizacji rejonów o podwyższonej sejsmiczności) pozwala bowiem na wyeliminowanie błędów estymacji współczynników regresji, wynikających z występowania, niejednokrotnie bardzo dużych, niedokładności w procesie wyznaczania współrzędnych ognisk wstrząsów górniczych.

## **2. Deformacje wytrzymałych warstw skalnych wywołane dokonaną i prowadzoną eksploatacją górniczą**

Za pomocą odpowiednio zmodyfikowanych wzorów teorii Budryka-Knothego (Białek J. i in. [5]) można prognozować ruchy sztywnych warstw skalnych górotworu zarówno pod, jak i nad eksploatowanym pokładem. Dokładność prognozy jest różna dla różnych wskaźników deformacji. Stosunkowo najdokładniej obliczane są przemieszczenia pionowe i nachylenia profilu niecki obniżeniowej. Znacznie mniej dokładnie prognozowane są przemieszczenia i odkształcenia poziome. Z kolei krzywizny profilu niecki cechują się bardzo dużym rozproszeniem losowym - Popiołek E. [12].

Warto również zwrócić uwagę na fakt, że różne metody prognozowania wpływów eksploatacji górniczej w jakościowo różny sposób opisują ruchy poziome wewnątrz górotworu. I tak na przykład, według teorii Budryka-Knothego przemieszczenia w pobliżu stropu eksploatowanego pokładu skierowane są w stronę zrobów, natomiast według rozwiązania B. Drzęźli [7] te same przemieszczenia skierowane są w stronę calizny. Biorąc pod uwagę powyższe względy, do opisu stanu zdeformowania wytrzymałych warstw skalnych wykorzystano następujące wskaźniki deformacji:

- odkształcenia pionowe,

- nachylenia profilu niecki,

pominięto natomiast wskaźniki charakteryzujące poziome ruchy górotworu oraz krzywizny profilu niecki obniżeniowej.

Wybór odkształceń pionowych w miejsce obniżeń podyktowany został tym, że jest to wskaźnik bardziej informatywny, powszechnie stosowany w zagadnieniach wpływu eksploatacji na obiekty podziemne. 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. Przyjęcie iloczynu tych wartości w miejsce, jak można by oczekiwać, ich sumy, wynika z tego, że skumulowane wpływy eksploatacji dokonanej mogą osiągać duże wartości, tak że wpływy aktualnie prowadzonej eksploatacji, zależne od wielu jej parametrów, byłyby pomijalnie małe. Oznaczałoby to, że o poziomie sejsmiczności (w tworzonym modelu regresji) decydują praktycznie tylko wpływy eksploatacji dokonanej. Jest to oczywiście sprzeczne z wynikami obserwacji, wskazującymi, że aktywność sejsmiczna jest zależna od parametrów prowadzonej eksploatacji (sposób kierowania stropem, długość, wysokość, postęp ściany, głębokość eksploatacji).

Zdeformowanie wytrzymałych warstw skalnych obliczano następująco:

$$wd1_i = s_j \sum_{l=1}^{lpkt} \int_{t_i}^{t_i+\Delta t} \left( T_{xl} \frac{dT_{xl}}{dt} + T_{yl} \frac{dT_{yl}}{dt} \right) dt \quad (1)$$

$$wd2_i = s_j \sum_{l=1}^{lpkt} \int_{t_i}^{t_i+\Delta t} \left( \varepsilon_{zl} \frac{d\varepsilon_{zl}}{dt} \right) dt \quad (2)$$

gdzie :

$wd1_i$  - wskaźnik zdeformowania warstwy skalnej w „i-tym” przedziale czasu, zależny od nachyleń profilu niecki obniżeniowej,

$wd2_i$  - wskaźnik zdeformowania warstwy skalnej w „i-tym” przedziale czasu, zależny od odkształceń pionowych,

$T_{xl}, T_{yl}$  - nachylenia profilu niecki obliczone w kierunkach osi X i Y w „l-tym” punkcie,

$\varepsilon_{zl}$  - odkształcenia pionowe w „l-tym” punkcie,

$t_i$  - początek „i-tego” przedziału czasu,  $t_i = t_p + (i-1) \Delta t$  dla  $i=1, \dots, ldt$ ,

$\Delta t$  - jednostkowy przedział czasu, dla którego obliczane są i porównywane wartości wskaźników deformacji i aktywności sejsmicznej,

$t_p$  - początek okresu obliczeniowego,

$ldt$  - liczba jednostkowych przedziałów czasu,

$lpkt$  - liczba punktów siatki obliczeniowej,

$s_j$  - pole jednostkowe, równe iloczynowi modułów siatki punktów obliczeniowych wzdłuż osi X i Y.

Wskaźniki  $wd1$  i  $wd2$  mogą przyjmować zarówno dodatnie, jak i ujemne wartości. Analiza lokalizacji rejestrowanych wstrząsów towarzyszących prowadzonym wyrobiskom ścianowym (np. Drzęzła B. i in. [8]) 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  $wd2$  (w analogiczny sposób jak w [9]).

### **3. Przyjęte wskaźniki sejsmiczności towarzyszącej prowadzonym robotom górniczym**

Z uwagi na to, że obecnie w kopalnianych stacjach geofizycznych rutynowo wyznaczane są jedynie współrzędne ognisk wstrząsów oraz ich energie sejsmiczne, w prowadzonych badaniach przyjęto następujące, podstawowe, wskaźniki charakteryzujące poziom sejsmiczności rejonów eksploatacyjnych :

- N - ilość wstrząsów zarejestrowanych w określonym przedziale czasu,
- E - sumaryczna energia sejsmiczna wstrząsów zarejestrowanych w określonym przedziale czasu.

W stosunku do obu tych parametrów można wysunąć pewne zastrzeżenia - S.Lasocki [11].

Otóż, tworzenie wskaźników zagrożenia na bazie wszystkich rejestrowanych zdarzeń uzależnia te wskaźniki od parametrów aparatury rejestrującej. Przy systemie pomiarowym o wyższej dynamice liczba zarejestrowanych zdarzeń, jak również ich sumaryczna energia będą większe od wartości, które uzyskałoby się przy niższej dynamice. Liczba rejestrowanych zdarzeń zależy również od lokalizacji sejsmometrów

względem rejonu aktywnego sejsmicznie i wielu innych własności systemu obserwacyjnego. Tak więc sumaryczna liczba i sumaryczna energia wstrząsów zależą od systemu pomiarowego, czyli od czynników nie związanych z fizycznym przebiegiem procesu powstawania wstrząsów. Wadą sumarycznej energii wstrząsów jest jej silna nieliniowość, powodująca, że jest ona zdominowana wartościami energii silnych zdarzeń. Wpływ wstrząsów słabych na wartość sumarycznej energii jest znikomy (jeden wstrząs o energii  $1 \times 10^6 \text{J}$  to aż 1000 wstrząsów o energii  $1 \times 10^3 \text{J}$ ).

Stosując wymienione wcześniej, przyjęte wskaźniki sejsmiczności starano się częściowo wyeliminować ich wady, między innymi poprzez :

- analizę rozmieszczenia stanowisk sejsmometrów w stosunku do rozpatrywanych rejonów aktywnych sejsmicznie - w szczególności wyeliminowano z badań rejonu, w których geometria sieci ulegała zmianie w trakcie prowadzenia eksploatacji, wybierano rejonu położone wewnątrz sieci pomiarowej,
- analizę bardzo silnych zjawisk sejsmicznych - w niektórych przypadkach silne wstrząsy górotworu mają charakter zdarzeń o charakterze regionalnym, są słabiej związane z aktualnie prowadzoną eksploatacją. Jeżeli są one wynikiem aktywacji zaburzeń tektonicznych, nie mogą być prognozowane opracowaną metodą.

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. Jednakże ze względu na to, że zależność Gutenberga-Richtera spełniona jest przez wstrząsy powyżej pewnego progu energetycznego (tylko część zdarzeń słabszych jest rejestrowana), jak również z uwagi na zmienność współczynnika  $b$  rozkładu, w zależności od aktualnego poziomu zagrożenia sejsmicznego, zdecydowano się w prowadzonych badaniach uwzględnić oba wskaźniki aktywności sejsmicznej.

#### 4. Model regresji sejsmiczności indukowanej prowadzoną eksploatacją względem deformacji wytrzymałych warstw skalnych

Biorąc pod uwagę fakt, że nawet gdyby udało się znaleźć ścisłą zależność funkcyjną pomiędzy zmieniającymi się w czasie składowymi tensora odkształcenia a zmianami aktywności sejsmicznej, to najprawdopodobniej byłaby ona zbyt skomplikowana do praktycznego zastosowania, w prowadzonych badaniach zdecydowano się zastosować metody analizy regresji. Metody te pozwalają przybliżyć poszukiwaną zależność funkcyjną inną, prostszą funkcją, taką jak wielomian, który zawiera odpowiednie zmienne i przybliża poszukiwaną funkcję w pewnych ograniczonych przedziałach. Ponadto, nawet jeśli nie istnieje zależność fizyczna pomiędzy analizowanymi wielkościami, dzięki metodzie regresji, można dążyć do powiązania ich za pomocą równania regresji. Chociaż równanie to może nie mieć znaczenia fizycznego, może ono być przydatne do przewidywania wartości zmiennej zależnej na podstawie znajomości zmiennych niezależnych - N.R.Draper, H.Smith [6].

W przyjętym modelu sumę energii (ilość) wstrząsów  $E_i$  wydzieloną w „i-tym” przedziale czasu określa poniższe wyrażenie

$$E_i = \sum_{k=1}^{lw} \sum_{j=1}^4 a_{kj} d_{kji} + \varepsilon_i \quad \text{dla } i = 1 \dots ldt \quad (3)$$

gdzie:

lw - liczba wytrzymałych warstw skalnych, w których zachodzące procesy deformacyjne powodują powstawanie wstrząsów,

$d_j$  - wartość „j”-tego wskaźnika deformacji,

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

a - parametry modelu regresji,

$\varepsilon$  - składnik losowy.

Duża liczba parametrów modelu (dla  $lw > 1$ ) została wymuszona brakiem wiarygodnych informacji o lokalizacji hipocentrow ognisk wstrząsów górniczych. W przypadku gdyby były dostępne dane o współrzędnej pionowej ognisk wstrząsów, możliwe byłoby powiązanie rejestrowanych wstrząsów z określonymi warstwami skalnymi i poszukiwanie oddzielnych równań regresji dla każdej z tych warstw.

## 5. Przykład prognozy zagrożenia sejsmicznego

Poniżej przedstawiono wyniki przykładowej prognozy sejsmiczności wykonanej dla rejonu ścian IIIa i IVa prowadzonych w pokładzie 703/1 KWK Rydułtowy. Ściany prowadzono systemem podłużnym z zawałem stropu na głębokości około 800 m. Miąższość pokładu wynosiła 1.2 do 1.3 metra. Nachylenie 12 do 18 stopni w kierunku wschodnim. W stropie pokładu występuje 2.0 m łupku i 9.0 m piaskowca, natomiast w spagu znajduje się łupek piaszczysty o miąższości 6.0 m oraz piaskowiec o miąższości 15 metrów.

Stosunkowo duże zagrożenie sejsmiczne, towarzyszące przedmiotowej eksploatacji było spowodowane m.in. :

- dużym natężeniem eksploatacji w rejonie W1,
- dużą głębokością eksploatacji,
- zaszłościami eksploatacyjnymi w pokładach sąsiednich,
- występowaniem kompleksów mocnych i zwięzłych skał (piaskowców i łupków piaszczystych), między innymi powyżej pokładu 629/1 o miąższości 110 metrów.

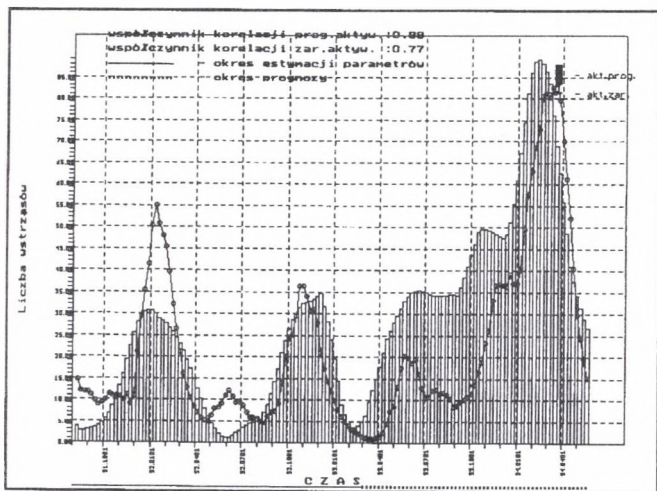
Okres prowadzenia ścian IIIa i IVa podzielono na dwa podokresy:

- 1.08.1991 do 1.03.1993 - okres estymacji parametrów modelu,
- 1.03.1993 do 26.05.1994 - okres predykcji w oparciu o wyznaczone równanie regresji.

Obliczenia przeprowadzone dla pierwszego podokresu pozwoliły stwierdzić istnienie silnych zależności korelacyjnych pomiędzy procesami deformacyjnymi zachodzącymi w górotworze a rejestrowaną sejsmicznością indukowaną prowadzoną eksploatacją górniczą. Wartość współczynnika determinacji wyniosła 0,84 , co oznacza, że 84% obserwowanej zmienności ilości wstrząsów można tłumaczyć zmianami stanu zdeformowania warstw skalnych. Odchylenie standardowe składnika resztowego (błąd prognozy) wyniosło 8,5. Wysoka wartość współczynnika determinacji i stosunkowo niskie odchylenie standardowe składnika resztowego kazały oczekiwać dobrych wyników predykcji dla drugiego podokresu, co istotnie się potwierdziło.

Na rys.1 przedstawiono wyniki obliczeń prognostycznych. Widać dobrą zgodność wykresów zarejestrowanej (linia ciągła) i prognozowanej (wykres słupkowy) ilości wstrząsów. Współczynnik korelacji pomiędzy

zarejestrowaną i prognozowaną aktywnością sejsmiczną dla okresu prowadzenia ściany IVa wyniósł 0,88.



Rys. 1. Zarejestrowana i prognozowana liczba wstrząsów - rejon W1 KWK Rydułtowy

Fig. 1. Recorded and forecasted number of tremors - area W1 of Coal Mine Rydułtowy

## 6. Podsumowanie

Opracowana metoda pozwala na predykcję, w oparciu o wyznaczone równania regresji, ilości i sumy energii wstrząsów, indukowanych projektowaną eksploatacją górnictwem. 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.

W modelu regresji nie uwzględniono parametrów wytrzymałościowych skał budujących górotwór. Wynika stąd, że metoda ma charakter lokalny, tzn. równanie regresji wyznaczone na podstawie zjawisk sejsmicznych zarejestrowanych w pewnej partii złoża, może być wykorzystywane do predykcji zagrożenia sejsmicznego tylko w tej samej partii złoża (w



obszarze, gdzie mamy podstawy zakładać, że parametry wytrzymałościowe skał są niezienne). Najlepszych rezultatów predykcji można oczekiwać w „środku” zakresu zmienności wskaźników deformacji obliczonych w trakcie estymacji parametrów modelu, gorszych rezultatów można się spodziewać z dala od „środku”. Dla wartości wskaźników deformacji niedostępnych przy obliczaniu współczynników regresji powinno się oczekiwać predykcji jeszcze gorszej.

Metody nie można 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. Białek J.,Jaworski A.: Próba oceny aktywności sejsmicznej na podstawie prognozowanych stanów deformacyjnych. ZN AGH s.Górnictwo z.142, Kraków 1989.
3. Białek J.,Drzęźła B.,Jaworski A.: Próba ustalenia zależności funkcyjnych pomiędzy przebiegiem deformacji górotworu w czasie a energią sejsmiczną dla warunków KWK Rydułtowy. Publs.Inst.Geophys. Pol.Acad.Sc.,M-16 (245), Warszawa 1992.
4. Białek J.,Drzęźła B.,Jaworski A.: Prognozowanie metodą analityczną wydatku energetycznego wstrząsów indukowanych w górotworze deformowanym eksploatacją wielopokładową. Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc.,M-19 (281), Warszawa 1995.
5. Białek J.,Jaworski A.,Pham Quang Ai: Propozycja efektywnego opisu składowej pionowej ruchów górotworu pod eksploatowanymi pokładami. ZN Pol.Śl.,Gliwice 1995.
6. Draper N.R., Smith H. : Analiza regresji stosowana. PWN, Warszawa 1973.
7. Drzęźła B.: Rozwiązanie pewnego przestrzennego zadania liniowej teorii sprężystości w zastosowaniu do prognozowania deformacji górotworu pod wpływem eksploatacji górniczej wraz z oprogramowaniem. ZN Pol.Śl.s.Górnictwo z.91, Gliwice 1978.

8. Drzęzła B., Białek J., Jaworski A., Bańka P., Słapa W. : Rozkład ilości i energii wstrząsów górniczych w sąsiedztwie czynnych wyrobisk ścianowych. Publ.Inst.Geophys.Pol.Acad.Sc.M-15 (235), Warszawa 1991.
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 nie publikowana.
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. Lasocki S.: Ocena i prognoza lokalnego ryzyka sejsmicznego poprzez analizę danych sejsmologicznych. Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej. Seria Wykłady Nr 12, Kraków 1996.
12. Popiołek E.: Probabilistyczna ocena zagrożenia obiektów chronionych filarem ochronnym. ZN AGH, s.Sozologia i Sozotechnika nr 33, Kraków 1991.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Józef Dubiński

Wpłynęło do Redakcji 20.09.1997 r.

## 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 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 seismic activity taking place in the

course of mining works have been described using two factors: number of tremors per week and total 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 Rydultowy coal mine heavily troubled by tremors.

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