

Aleksander CIANCIARA, Bogdan CIANCIARA

Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii Geofizyki i Ochrony Środowiska, Kraków

## **Problematyka monitorowania zagrożenia tąpnięciami w kopalniach podziemnych na bazie emisji sejsmicznej rejestrowanej w warunkach wysokiego poziomu zakłóceń**

### **Streszczenie**

W pracy przedstawiono sposób oceny stanu zagrożenia tąpnięciami na podstawie analizy emisji sejsmicznej rejestrowanej w miejscach prowadzonej eksploatacji. Znaczna część emisji, rejestrowanej w tych warunkach, jest generowana na drodze działania urządzeń mechanicznych (kombajnu przenośników itp.). W związku z tym nie jest możliwe uzyskiwanie właściwych ocen zagrożenia, stosując interpretację opartą na znanych teoriach oraz modelach opisujących pęknięcie górotworu. Dlatego zaproponowano inne podejście, w którym zagrożenie ocenia się badając przebiegi czasowe parametru opisującego tłumienie drgań sejsmicznych przez ośrodek skalny. Tłumienie to estymowane jest na podstawie analizy emisji sejsmicznej w paśmie od 30 Hz do 500 Hz. Stwierdzono eksperymentalnie, że w tym paśmie zawarta jest główna część informacji o parametrze tłumienia, niezależnie od sposobu generowania sygnałów emisji. W pracy przedstawiono sposób estymacji tłumienia, na drodze analizy obwiedni sygnałów omawianej emisji. Przebiegi czasowe tłumienia mają oczywistą interpretację geomechaniczną, mogą stanowić podstawę do opracowania sposobu monitorowania stanu zagrożenia tąpnięciami.

### **1. Wprowadzenie**

Od szeregu lat podejmowane są próby opracowania skutecznego sposobu monitorowania stanu zagrożenia tąpnięciami w kopalniach podziemnych. Problematyka ta jest niezwykle ważna, głównie w odniesieniu do rejonów prowadzonej eksploatacji, ze względu na bezpieczeństwo załóg górniczych. Monitorowanie zagrożenia tąpnięciami prowadzone jest na podstawie rejestrowanej, bezpośrednio w tych rejonach, emisji sejsmoakustycznej. Rejestrowana, w tych warunkach, emisja charakteryzuje się wysoką aktywnością, jednak jest ona głównie generowana działaniem urządzeń mechanicznych. Praktycznie nie jest możliwe wydzielenie, z ogólnego pola emisji, składnika związanego z pękaniem skał. Tego typu emisja, z punktu widzenia klasycznych zasad interpretacji jest traktowana jako zakłócenie, które nie podlega modelom oraz teoriom opisującym pęknięcie górotworu. Wynika stąd, że oparte na tych zasadach monitorowanie zagrożenia tąpnięciami jest mało efektywne.

W pracy przedstawiono koncepcję wykorzystania tego typu emisji do omawianego monitorowania. W związku z tym podjęto badania, których celem było stwierdzenie, czy na podstawie tej emisji jest możliwe ocena zagrożenia tąpnięciami. Badania prowadzono metodą heurystyczną na podstawie materiału pomiarowego rejestrowanego w warunkach kopalń węgla

kamiennego oraz rud miedzi. W pierwszej kolejności analizowano sygnały emisji pod kątem określenia czynnika, który nie zależy od sposobu ich generowania, natomiast zależy od parametrów fizycznych ośrodka skalnego. Czynnikiem takim może być współczynnik reprezentujący tłumienie amplitud sygnałów. W trakcie badań stwierdzono, że informacja o tłumieniu amplitud zawarta jest w sygnałach emisji w zakresie częstotliwościowym, na ogół nieprzekraczającym 500 Hz. Przyjmuje się, że omawiany współczynnik tłumienia jest proporcjonalny do parametru fizycznego opisującego stopień tłumienia drgań sejsmicznych w ośrodku skalnym. Wartości tego współczynnika podlegają określonym zmianom wraz ze wzrostem stanu naprężeń. Jest rzeczą oczywistą, że w okresach przed wystąpieniem wstrząsu musi wystąpić wzrost naprężeń. Przebiegające w górotworze procesy, wywołane wzrastającym stanem naprężeń, można określać na podstawie badań laboratoryjnych. Wykonując testy wytrzymałościowe próbek ściskanych za pomocą sztywnych pras, stwierdzono charakterystyczny przebieg zależności naprężenia ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) od odkształcenia ( $\varepsilon$ ) (Jaeger, Cook 1969). W fazie początkowej wzrostu naprężeń wytwarza się proces kompaktacji (twardnienia próbki), następnie w miarę dalszego wzrostu występuje pęknięcie (osłabianie), któremu towarzyszy zjawisko dylatacji (Nur 1975; Kwaśniewski 1986). Zniszczenie próbki zachodzi dopiero w fazie dylatacji, wówczas gdy krzywa opisująca zależność naprężenie – odkształcenie osiągnie wartość maksymalną (Goszcz 1999). Przyjmuje się, że podobnie zachowuje się ośrodek skalny. Pod wpływem wzrostu naprężeń ośrodek podlega kompaktacji, a następnie, w fazie pęknięcia, dylatacji, dopiero wówczas może wystąpić wstrząs. Zjawiska te powodują zmiany parametrów fizycznych ośrodka skalnego, a w szczególności tłumienia drgań sejsmicznych. W fazie kompaktacji ma miejsce spadek tłumienia, a w fazie dylatacji jego wzrost. Wynika stąd, że na podstawie współczynnika tłumienia jest możliwa ocena stanu górotworu, a tym samym czasu wystąpienia wstrząsów.

Stopień tłumienia można oceniać na wiele sposobów, między innymi w oparciu o parametr reprezentujący asymetrię sygnałów emisji (Cianciara, Cianciara 2004). Innym rozwiązaniem, przedstawionym w tej pracy, jest ocena uzyskiwana na drodze analizy widma amplitudowego obwiedni sygnałów. Konieczne jest w tym celu opracowanie odpowiednich modeli, które umożliwiają powiązanie współczynnika tłumienia z danymi pomiarowymi, oraz określenie sposobu jego estymacji. Jest wówczas możliwa ocena wartości współczynnika tłumienia na drodze analizy kolejno napływające sygnałów, uzyskując w efekcie jego przebieg w formie szeregu czasowego. Otrzymany szereg czasowy, w ogólnym przypadku, może być opisywany modelem w formie niestacjonarnego procesu stochastycznego. Przyjmuje się, że jego wartość oczekiwana jest proporcjonalna do przebiegu stopnia tłumienia drgań sejsmicznych ośrodka skalnego. Odnosi się to do określonego obszaru otaczającego miejsce rejestracji emisji. Aby potwierdzić słuszność prezentowanych w tej pracy rozważań, podjęto próby identyfikacji przebiegów tłumienia w okresach przed i po wystąpieniu wstrząsów. Identyfikację prowadzono na podstawie sygnałów emisji sejsmoakustycznej rejestrowanej w warunkach kopalń węgla kamiennego oraz rud miedzi. Uzyskane wyniki w pełni potwierdzają słuszność przedstawionych tutaj tez, co zostało zilustrowane na rysunkach 4.1 oraz 4.2. Przedstawiony sposób interpretacji emisji sejsmicznej może stanowić podstawę monitorowania stanu zagrożenia tąpniętami, pod warunkiem, że istnieje możliwość ciągłej estymacji omawianego współczynnika tłumienia w czasie.

## 2. Model sygnału sejsmicznego

Jak już wspomniano we wstępie, emisja sejsmiczna rejestrowana w wyrobiskach górniczych, w trakcie prowadzonej eksploatacji, zawiera znaczny poziom zakłóceń. Najczęściej zakłócenia generowane są przez pracujące urządzenia mechaniczne. Zakłócenia mają charakter impulsowy, a ich przebiegi są podobne do sygnałów powstających na drodze naturalnego pęknięcia górotworu. Dlatego praktycznie nie jest niemożliwe ich wydzielenie z ogólnego pola emisji. Ze względu na zróżnicowany charakter powstawania zjawisk sejsmicznych rejestrowane sygnały emisji posiadają skomplikowaną budowę. Jednak można je opisywać bardzo ogólnym modelem, w formie iloczynu obwiedni oraz czynnika oscylacyjnego. Model taki można wyrazić następująco:

$$x(t) = r(t) \cdot \mathcal{G}(t) \quad (2.1)$$

gdzie:

$r(t)$  – obwiednia,  
 $\mathcal{G}(t)$  – czynnik oscylacyjny.

Obwiednię  $r(t)$  wyraża się za pomocą modułu sygnału analitycznego, czyli:

$$r(t) = |x^A(t)| \quad (2.2)$$

gdzie sygnał analityczny jest wielkością zespoloną

$$x^A(t) = x(t) + i\hat{x}(t)$$

w której czynnik  $\hat{x}(t)$  stanowi transformatę Hilberta sygnału  $x(t)$  (Franks 1975).

Stwierdzono, że w przypadku emisji sejsmoakustycznej obwiednia zawiera pełną informację o jakości propagacji drgań (Cianciara, Cianciara 2004). Przyjmuje się, że obwiednia jest funkcją zależną od współczynnika tłumienia  $\alpha > 0$ , którą można wyrazić następująco:

$$r(t) = r(\alpha \cdot t) \quad (2.3)$$

Jak wynika z powyższych rozważań obwiednie sygnałów stanowią właściwą podstawę do oceny wartości współczynnika tłumienia  $\alpha$ . Jednak konieczna jest w tym celu znajomość modelu, który określa powiązanie tego współczynnika z danymi pomiarowymi. Opracowanie takiego modelu w dziedzinie czasu jest trudne ze względu na skomplikowany przebieg obwiedni empirycznych. Dodatkowo, model powinien być jak najprostszy, aby zapewnić możliwie największą efektywność estymacji. Stwierdzono, że zagadnienie to może być rozwiązane skutecznie w dziedzinie widmowej. Z zasady dualności wynika, że cała informacja o kształcie sygnału jest również zawarta w reprezentacji widmowej obwiedni  $R(f)$ , a tym samym w jej widmie amplitudowym. Zgodnie z zależnością (2.3), uwzględniając zasadę skalowania, widmo amplitudowe  $W_r(f)$  obwiedni  $r(t)$  przyjmuje postać:

$$W_R(f) = \frac{1}{\alpha} \left| R\left(\frac{1}{\alpha} \cdot f\right) \right| \quad f \geq 0 \quad (2.4)$$

gdzie:

$R(f)$  – transformata Fourier'a obwiedni  $r(t)$

$\alpha > 0$  – współczynnik tłumienia.

Stwierdzono, że model widma amplitudowego obwiedni sygnałów sejsmoakustycznych można z powodzeniem aproksymować funkcją wykładniczą. Omawiane widmo zawiera określony poziom czynnika losowego i jest zawsze dodatnie, dlatego można go wyrazić następująco (Cianciara, Cianciara 2004):

$$W_R(f) = C \cdot \exp[-\lambda \cdot f + \varepsilon(f)] \quad f \geq 0 \quad (2.5)$$

gdzie:

$\lambda > 0$  – parametr,

$\varepsilon(f)$  – odchyłki losowe.

### 3. Sposób estymacji tłumienia drgań sejsmicznych

Zdecydowano, aby współczynnik tłumienia estymować (oceniać) na podstawie widma amplitudowego obwiedni  $W_R(f)$ . Przemawiają za tym względy teoretyczne oraz to, że daje się go opisać stosunkowo prostym modelem (2.5) z dwoma parametrami –  $C$  oraz  $\lambda$ . Model ten jest sprowadzalny do formy liniowej przez logarytmowanie, a mianowicie:

$$\ln W_R(f) = \ln C - \lambda \cdot f + \varepsilon(f) \quad f \geq 0 \quad (3.1)$$

Zakładając, że odchyłki losowe  $\varepsilon(f)$  tworzą układ nieskorelowany o zerowej wartości oczekiwanej, wówczas estymatory parametrów  $\hat{C}$  oraz  $\hat{\lambda}$  uzyskuje się rozwiązując odpowiedni układ równań normalnych. Z zależności (2.4), (2.5) oraz (3.1) wynika, że estymator tłumienia  $\hat{\alpha}$  jest odwrotnie proporcjonalny do parametru  $\lambda$  czyli:

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{\hat{\lambda}}$$

Ze względów praktycznych dalsza analiza prowadzona jest na podstawie odwrotności współczynnika tłumienia, czyli parametru  $\hat{\lambda}$ . Parametrowi temu przypisuje się czas  $t$  wystąpienia sygnału  $x_t$ , na podstawie którego był on estymowany. Otrzymuje się wówczas szereg czasowy, który reprezentuje jego przebieg zmienności w czasie. Jak wynika z praktyki, omawiany szereg czasowy  $\{\hat{\lambda}_t\}$  zawiera stosunkowo wysoki poziom czynnika losowego. Związane jest to z tym, że źródła sygnałów rozłożone są przypadkowo w obszarze otaczającym miejsce rejestracji emisji, a rozkład przestrzenny parametrów fizycznych charakteryzuje się określonym rozrzutem statystycznym.

Przyjęto, aby w pierwszym przybliżeniu omawiany szereg czasowy opisywać modelem addytywnym, a mianowicie:

$$\hat{\lambda}_t = d_t + \eta_t \quad (3.2)$$

gdzie:

$d_t$  – wartość oczekiwana szeregu czasowego  $\{\hat{\lambda}_t\}$ ,

$\eta_t$  – wartości losowe.

Przebieg czasowy parametru  $d_t$  jest proporcjonalny do względnych zmian uśrednionej odwrotności tłumienia. Wartość tę należy odnosić do określonego obszaru ośrodka, otaczającego miejsce rejestracji emisji. Ze względu na dynamikę zjawisk przebiegających w górotworze, szereg czasowy  $\{\hat{\lambda}_t\}$  jest procesem niestacjonarnym. Dlatego do wyznaczenia estymatora jego wartości oczekiwanej  $\hat{d}_t$  zastosowano filtrację Kalmana (Papoulis 1972). Estymacja prowadzona jest w określonym oknie czasowym „ $T$ ” na podstawie zbioru wartości  $\{\hat{\lambda}_{t-\tau}\}$ ,  $\tau \in [0, T]$ , poprzedzających chwilę  $t$ , gdzie  $t$  jest czasem realnym.

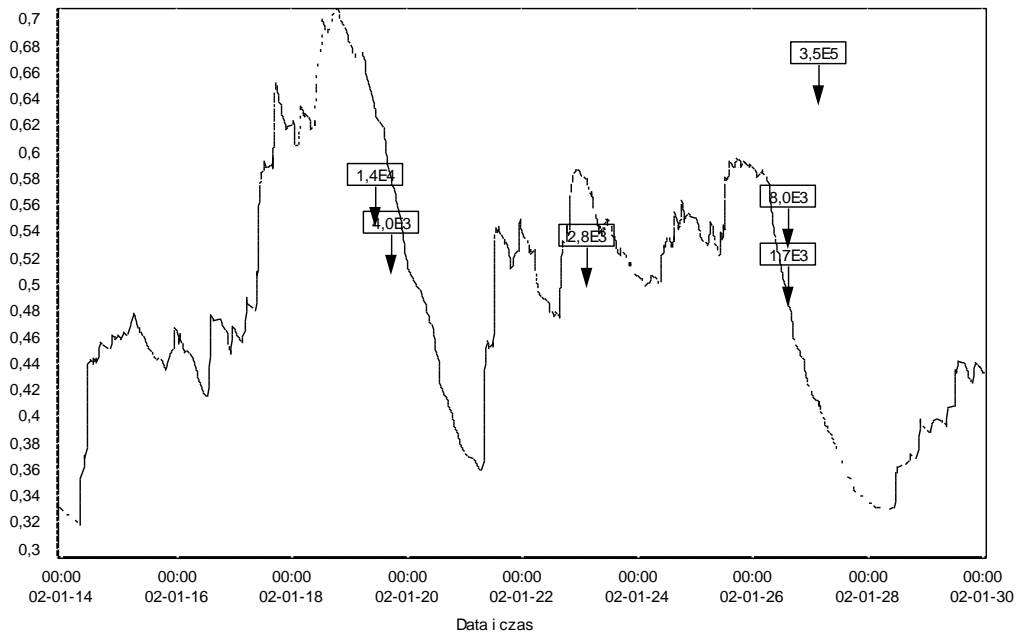
#### 4. Praktyczne zastosowanie do oceny stanu zagrożenia tąpnięciami

Przyjmuje się, że wartości  $\hat{d}_t$  są proporcjonalne do odwrotności uśrednionego parametru fizycznego reprezentującego stopień tłumienia drgań sejsmicznych w ośrodku skalnym. Odnosi się to do określonego obszaru górotworu, otaczającego miejsce rejestracji emisji. W przypadku ośrodków kruchych, czyli takich, z jakimi mamy do czynienia w rzeczywistości, na podstawie przebiegu parametru  $\hat{d}_t$  można prowadzić identyfikację fazy kompaktacji (wzmacniania) oraz dylatacji (osłabiania) ośrodka skalnego. Jak już wspomniano wyżej faza kompaktacji charakteryzuje się spadkami tłumienia, natomiast w fazie dylatacji mają miejsce wzrosty tłumienia. W okresach przed wystąpieniem wstrząsów muszą wzrastać naprężenia w górotworze. Wzrost naprężeń powoduje wystąpienie fazy kompaktacji, a dopiero następnie – w miarę dalszego wzrostu fazy dylatacji – może wystąpić wstrząs. Stwierdzenie to zostało poddane praktycznej weryfikacji, a jej wynik zilustrowano na rysunkach 4.1 oraz 4.2.

Na rysunku 4.1 przedstawiono przykładowy przebieg parametru  $\hat{d}_t$  obejmujący okres około jednego miesiąca. Estymację tego parametru prowadzono na podstawie emisji sejsmicznej zarejestrowanej w rejonie ściany 41 pokładu 504 KWK „JAS-MOS”. Rejestracja emisji prowadzono w paśmie od 30 do 500 Hz, za pomocą czujnika zamocowanego na kotwi w skałach stropowych wyrobiska.

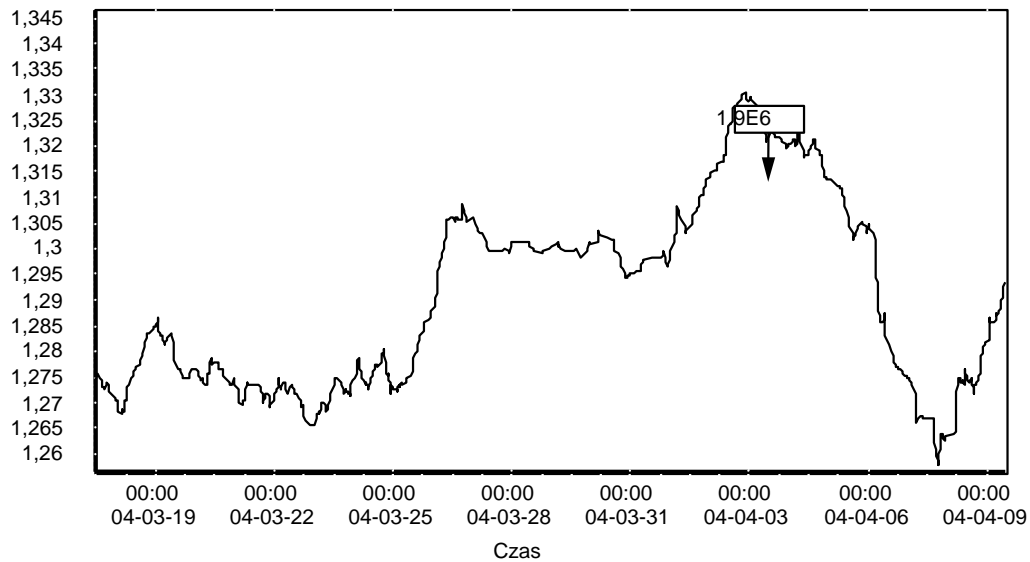
Natomiast na rysunku 4.2 przedstawiono przykładowy przebieg parametru  $\{d_t\}$  estymowany na podstawie emisji sejsmicznej rejestrowanej w rejonie oddziału G-22 ZG „Rudna”. Rejestrację emisji, podobnie jak w poprzednim przypadku, prowadzono w paśmie od 30 do 500 Hz, za pomocą czujników mocowanych w skałach stropowych w otworach jednowęzłowych.

Analizując przedstawione na tych rysunkach przebiegi parametru  $\{d_t\}$  widzimy, że przed momentami wystąpienia wstrząsów mają miejsce wzrost a następnie spadki jego wartości. Na rysunkach tych zaznaczono momenty wystąpienia wstrząsów, oraz ich energie. Wielkości amplitud przebiegu parametru  $\{d_t\}$  zależą od: energii wstrząsów, odległości ich obszarów źródłowych od miejsca lokalizacji czujników, itp.



Rys. 4.1 Przykładowy przebieg parametru  $\hat{d}_t$  estymowany na podstawie emisji rejestrowanej w rejonie ściany 41 pokładu 504 KWK „JAS-MOS”

Fig. 4.1. Example plot representing  $\hat{d}_t$  estimated on the basis of seismic emissions registered in the zone of level no. 504 in the “Jas-Mos” Coal Mine



Rys. 4.2. Przykładowy przebieg parametru  $\{d_t\}$  estymowany na podstawie emisji sejsmicznej rejestrowanej w rejonie oddziału G-22 ZG „Rudna”

Fig. 4.2. Example plot representing  $\{d_t\}$  estimated on the basis of seismic emissions registered in the zone G-22 in the ZG “Rudna” Copper Mine

## 5. Podsumowanie

W pracy tej przedstawiono koncepcję sposobu oceny stanu zagrożenia tąpnięciami wyrobisk, w miejscach prowadzonej eksploatacji górniczej. Koncepcja ta oparta jest na analizie czasowych przebiegów parametru  $d_t$  reprezentującego wartość proporcjonalną do stopień tłumienia drgań sejsmicznych ośrodka skalnego. Ocena tego parametru uzyskiwana jest na podstawie analizy sygnałów emisji sejsmoakustycznej w zakresie częstotliwościowym od 30 do 500 Hz. Emisja rejestrowana jest w rejonach wyrobisk górniczych, gdzie występuje wysoki poziom zakłóceń. Na ogół charakteryzuje się ona bardzo wysoką aktywnością, lecz znaczna część sygnałów generowana jest na drodze działania mechanicznego. Dlatego interpretacja emisji, pod kątem oceny zagrożenia, nie może być prowadzona na podstawie teorii (modeli) opisujących pękanie górotworu. Jest natomiast możliwa ocena tłumienia amplitud sygnałów, ponieważ wartość tego parametru nie zależy od sposobu generowania emisji.

W pracy przedstawiono próby wykorzystania przebiegów w czasie omawianego parametru do oceny stopnia zagrożenia wystąpieniem wstrząsów. Jest oczywistym, że przed wystąpieniem wstrząsów muszą mieć miejsce odpowiednie wzrosty naprężeń. Wówczas w ośrodku skalnym występują zjawiska kompaktacji, a następnie dylatacji. Powodują one zmiany parametrów fizycznych ośrodka skalnego, a w szczególności zmiany współczynnika tłumienia drgań sprężystych. W fazie kompaktacji ma miejsce spadek tłumienia, a w fazie dylatacji jego wzrost. Wynika stąd, że na podstawie przebiegu parametru opisującego tłumienie jest możliwe określenie tendencji rozwoju omawianych faz. Parametr ten jest estymowany na drodze zaawansowanej analizy statystycznej sygnałów sejsmoakustycznych. Analiza przebiegu tego parametru umożliwia ocenę stanu górotworu w okresach poprzedzających momenty wystąpienia wstrząsów. Przedstawione w tekście przykłady (przebieg na rysunkach 4.1 i 4.2) stanowią ilustrację potwierdzającą możliwość oceny omawianych faz na podstawie analizy emisji sejsmoakustycznej. Stanowi to podstawę do opracowania sposobu monitorowania stopnia zagrożenia tąpnięciami. Aktualnie prowadzona jest weryfikacja omawianego sposobu monitorowania w warunkach przemysłowych.

*Praca została wykonana w ramach badań statutowych Zakładu Geoinformatyki i Informatyki Stosowanej, Wydziału Geologii Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH, nr 11.11.140.144.*

## Literatura

- [1] Cianciara B. 1999: Emisja sejsmiczna jako nośnik informacji o rozwoju procesu pęknięcia górotworu. *Geoinformatica Polonica* nr 1, Prace Komisji Geoinformatyki, PAU, Kraków, 37–44.
- [2] Cianciara A., Cianciara B. 2004: Zagadnienia identyfikacji procesów geodynamicznych wywołanych eksploatacją górniczą. *Geoinformatica Polonica*, vol. 6, Prace Komisji Geoinformatyki, PAU, Kraków, 17–32.
- [3] Franks L. 1969: *Signal Theory*, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.J.
- [4] Goszcz A. 1999: *Elementy mechaniki skał oraz tąpnięcia w polskich kopalniach węgla i miedzi*. PAN Sigmie, Kraków.
- [5] Jaeger C., Cook N.G.W. 1969: *Fundamentals of Rock Mechanics*, London Chapman and Hall.
- [6] Kwaśniewski M. 1986: Dylatacja jako zwiastun zniszczenia skały. Część I: Fizyczna istota zjawiska dylatacji. *Przegląd Górniczy* nr 2, 42–49.
- [7] Nur A. 1975: A Note of the Constitutive Law for Dilatancy. *Pageoph*, vol. 113.
- [8] Papoulis A. 1972: *Prawdopodobieństwo, zmienne losowe i procesy stochastyczne*. WNT, Warszawa.

### **Tremor risk monitoring in underground mines on the basis of seismic emission registered in strongly disturbed environment**

In the paper there is presented a method of tremor risk estimation on the basis of seismic emission registered in exploitation zones. A considerable part of the emission, registered in exploitation zones, is generated by mechanical devices (miner transporters etc.). Therefore using the known theories and models describing rock mass fracturing, it is not possible to evaluate the risk of mining rock-burst properly on the basis of seismic emission interpretation. In the new approach presented in the paper, the risk is estimated studding the time variations of a parameter describing the attenuation of seismic vibrations by the rock medium. The attenuation is assessed from the analysis of seismic emission registered in the range from 30 Hz to 500 Hz. There was experimentally stated that, in this range there is the main part of information is about attenuation, regardless the way signals were generated.

In the paper there is presented the attenuation factor estimation method on the basis of signals envelopes analysis of the discussed emission. Trends of attenuation can be geo-mechanically interpreted in an obvious way, and can be used as base for tremor risk monitoring system.

*Przekazano: 31 marca 2006 r.*