

## Możliwości predykcji wstrząsów na podstawie analizy zjawisk maksymalnych emisji sejsmicznej w systemie INGEO

*Predykcja czasu wystąpienia wstrząsów w systemie INGEO oparta jest na analizie emisji sejsmicznej rejestrowanej w systemie seismoakustycznym. Sygnały emisji są generowane pękaniem górotworu wywołanym eksploatacją. Emisja taka charakteryzuje się dużą aktywnością zjawisk, która umożliwia prowadzenie poprawnej analizy statystycznej metodą hazardu, uzyskując również odpowiednio wysoką rozdzielczość wyników interpretacji. Metoda hazardu oparta jest na analizie zjawisk maksymalnych, czyli zjawisk o maksymalnej energii. Zastosowanie tej metody daje znaczną eliminację zakłóceń, a jednocześnie umożliwia ocenę prawdopodobieństwa wystąpienia zjawisk wysokoenergetycznych (wstrząsów). Analiza hazardu realizowana jest na podstawie dwóch podstawowych cech emisji sejsmicznej, a mianowicie: energii zjawisk, oraz odstępów czasu między kolejnymi zjawiskami. Cechy te są zmiennymi losowymi o rozkładzie statystycznym, który jest opisywany modelem Weibull'a. Na podstawie tego modelu prowadzona jest estymacja parametrów rozkładu statystycznego tych cech, które stanowią podstawę do wyznaczania parametrów hazardu. Analiza realizowana jest w oparciu o dane pomiarowe pobierane z okna  $T$ , czyli przedziału czasu rzędu godzin. Okno to jest przesuwane z krokiem  $d$  i powtarzane są obliczenia. Wykorzystując parametry hazardu zdefiniowano funkcję ryzyka  $FW_r(Q_E, T)$ , będącą miarą zagrożenia wystąpieniem wstrząsów. Funkcja ta jest zależna od czasu realnego  $t$ , który jest określony, jako czas prawego brzegu okna  $T$ . Stanowi ona podstawę do opracowania kryteriów stanu zagrożenia tąpnięciami, jak również jej przebieg może być wykorzystany do oceny czasu wystąpienia wstrząsów. Należy podkreślić, że moment wystąpienia wstrząsu jest zmienną losową i może być wyznaczony z dokładnością do swojego przedziału ufności, z określonym prawdopodobieństwem.*

Słowa kluczowe: emisja sejsmiczna, metoda hazardu, strumień zdarzeń, model Weibull'a, wstrząsy, zagrożenie sejsmiczne

### 1. WPROWADZENIE

---

Na skutek prowadzonej eksploatacji podziemnej wytwarza się w górotworze otaczającym wyrobiska górnicze, niekorzystny stan naprężeń. Gdy zostaną przekroczone wartości wytrzymałości krytycznych, wówczas rozpoczyna się pęknięcie skał. Pęknięcie przebiega w określony sposób aż do momentu wystąpie-

nia wstrząsu [9]. Pęknięcie jest zjawiskiem fizycznym, które nie podlega bezpośrednim obserwacjom. Można jednak pośrednio wnioskować o jego przebiegu, ponieważ wytwarza ono drgania rozchodzące się w górotworze w formie emisji sejsmicznej [8].

Artykuł jest poświęcony problematyce opracowania sposobu oceny stanu zagrożenia tąpnięciami oraz predykcji czasu wystąpienia wstrząsów, zastosowanego w systemie INGEO. Sposób ten oparty jest na

analizie niskoenergetycznej emisji sejsmicznej rejestrowanej systemem seismoakustycznym. Analiza w przedmiotowym zakresie prowadzona jest na podstawie dwóch podstawowych cech emisji, a mianowicie energii zjawisk i odstępów czasu między kolejnymi zjawiskami. Rejestrowana w tym zakresie emisja posiada dużą aktywność dochodzącą nawet do kilkudziesięciu zjawisk na minutę. Charakteryzuje się ona dużym stopniem losowości, oraz może zawierać znaczny poziom zakłóceń. Dlatego jej badanie prowadzone jest metodami probabilistycznymi. Przedstawiona tutaj koncepcja rozwiązania przedmiotowego problemu, realizowana jest na drodze analizy zjawisk maksymalnych emisji sejsmicznej metodą hazardu [6]. Prowadząc detekcję zjawisk maksymalnych uzyskujemy znaczną eliminację zakłóceń, a dalsze usuwanie zakłóceń dokonuje się w trakcie estymacji rozkładów statystycznych cech emisji. Natomiast zastosowanie stochastycznej analizy hazardu umożliwia ocenę prawdopodobieństwa wystąpienia zjawisk o maksymalnej energii (wstrząsów). Zjawiska maksymalne określone są na podstawie ich energii. Wiadomo, że nie jest możliwa dokładna lokalizacja źródeł emisji w zakresie niskoenergetycznych zjawisk, czyli pęknięć o małych rozmiarach, ponieważ stosunkowo niewielkie sygnały świadczące o tej emisji docierają do małej liczby czujników. Dlatego nie jesteśmy w stanie ocenić energii fizycznej tych zjawisk, ponieważ do jej wyznaczenia konieczna jest znajomość odległości pomiędzy źródłem drgań a miejscem rejestracji. W związku z tym przyjęto, aby energię tą określać, jako kwadrat normy rejestrowanych sygnałów [2]. Ponieważ źródła emisji są rozmieszczone losowo w górotworze, dlatego tak określona energia podlega rozrzutowi statystycznemu, co powoduje w niej udział czynnika losowego. Omawiane odstępów czasu są wielkościami fizycznymi, praktycznie nie zależą od rozkładu przestrzennego źródeł, a ich wartości mogą być oceniane z dużą precyzją. Należy nadmienić, że istnieje liniowa zależność statystyczna pomiędzy logarytmami energii zjawisk a odstępami czasu między momentami ich wystąpień. Orzeka ona, że do wytworzenia się zjawisk sejsmicznych o większych energiach potrzebny jest dłuższy odstęp czasu. Zależność ta została sformułowana i udokumentowana w zakresie wstrząsów, dla których było możliwe określenie energii fizycznej [3]. Dlatego przyjęto, że w sensie statystycznym cecha ta pośrednio może reprezentować energię zjawisk. Wymienione cechy emisji sejsmicznej są zmiennymi losowymi o rozkładach statystycznych opisywanych modelem Weibull'a. Znajomość rozkładu statystycznego omawianych cech umożliwia ocenę parametrów hazardu pod warunkiem, że ener-

gia zjawisk przekracza zadany poziom  $Q_E$ . Estymacja tych wielkości prowadzona jest na podstawie danych pobieranych z przedziału czasu  $T$  (okna), o wielkości rzędu godzin. Na podstawie omawianych parametrów hazardu zostało zdefiniowane tzw. ryzyko wystąpienia wstrząsu, przypisane do okna  $T$ . Z kolei przesuwając omawiane okno z krokiem  $d$ , uzyskamy jego przebieg w formie „funkcji ryzyka”  $FW_t(Q_E, T)$ , której zmienną niezależną jest czas realny  $t$ . Na podstawie przebiegu tej funkcji prowadzona jest ocena stopnia zagrożenia tąpnięciami oraz predykcja momentów wystąpienia wstrząsów.

## 2. SPOSÓB OCENY ZAGROŻENIA TĄPNIAМИ I PREDYKCJI CZASU WYSTĄPIENIA WSTRZĄSÓW, REALIZOWANY METODĄ HAZARDU

---

Wstrząsy górnicze charakteryzuje znaczny udział czynnika losowego, dlatego ocena zagrożenia tąpnięciami i predykcja czasu wystąpienia wstrząsów są realizowane metodami stochastycznymi. Skutkiem niekorzystnego stanu naprężeń, wywołanego eksploatacją, jest pęknięcie górotworu. Na ogół poszczególne pęknięcia są ze sobą powiązane tworząc tzw. procesy pęknięcia. Przy dużych wartościach naprężeń rosną również rozmiary pęknięć. Jeżeli wstrząs spowoduje odpowiedni spadek wartości naprężeń, wówczas stanowi on zakończenie procesu pęknięcia. Przedstawiony sposób oparty jest na analizie emisji sejsmicznej, która odwzorowuje procesy pęknięcia górotworu. Przyjmuje się, że zarówno poszczególne pęknięcia jak i wywołane nimi zjawiska emisji mają ten sam charakter losowy. Badanie realizowane jest na podstawie cech emisji, czyli energii zjawisk (sygnałów) oraz odstępów czasu między zjawiskami, które są zmiennymi losowymi o znanym rozkładzie statystycznym. Rozwiązania przedmiotowych zadań metodami probabilistycznymi nie prowadzi się bezpośrednio na podstawie cech emisji, lecz jest oparte na analizie parametrów opisujących ich rozkłady statystyczne. Parametry te estymowane (oceniane) są na podstawie odpowiednich zbiorów danych pomiarowych. W omawianej problematyce elementami tych zbiorów są zjawiska sejsmiczne lub sygnały drgań sejsmicznych, zarejestrowane w przedziałach czasu (oknach)  $T$  o określonej wielkości, np. jednej godziny. Do prowadzenia analiz statystycznych, jak również uzyskiwania ocen przebiegu zagrożenia wystąpieniem wstrząsów, konieczna jest znajomość: prawa opisującego rozkładu statystyczne cech emisji oraz modelu funkcji odwzorowującej stany zagrożenia.

### 3. MODELE ROZKŁADÓW STATYSTYCZNYCH CECH, ZJAWISK MAKSYMALNYCH, EMISJI SEJSMICZNEJ

Pęknięcie górotworu jest zjawiskiem fizycznym, które nie podlega bezpośrednim obserwacjom. Pęknięcia wywołują drgania, które rozchodzą się w ośrodku skalnym w formie emisji sejsmicznej. Rejestrowane sygnały emisji stanowią podstawę do wnioskowania, na zasadzie zagadnienia odwrotnego, o przebiegu pęknięcia. Rejestracja emisji sejsmicznej prowadzona jest za pomocą czujników odpowiednio rozmieszczonych w górotworze. Zjawisko sejsmiczne jest określone przez zbiór zarejestrowanych sygnałów pochodzących od tego samego źródła. Dlatego zjawiska sejsmiczne odwzorowują poszczególne pęknięcia. Miarą rozmiarów pęknięć jest energia, odpowiadających im, zjawisk sejsmicznych, natomiast czasy ich wystąpienia są utożsamiane z czasami początku rejestracji zjawisk. Zarówno czasy wystąpienia pęknięć jak i ich rozmiary są wielkościami losowymi o określonych rozkładach statystycznych. Celem badań jest analiza prowadzona pod kątem rozwoju rozmiarów zjawisk, czyli pęknięć, spowodowanych stanem naprężeń. W tym przypadku powstające pęknięcia są zależne od siebie w czasie i układają się w ciągi zwane procesami pęknięcia.

Badanie procesu pęknięcia, oparte jest na analizie maksymalnych zjawisk sejsmicznych. Zjawiska maksymalne mogą być określane na dwa sposoby: gdy sygnał pochodzący od zjawiska został zarejestrowany na wielu stanowisk pomiarowych, lub wprost na podstawie energii sygnałów. Zjawiska maksymalne stanowią właściwe dane do wnioskowania o rozwoju procesu pęknięcia, aż do momentu wystąpienia wstrząsów. Ocena rozwoju pęknięcia realizowana jest na podstawie analizy parametrów rozkładu statystycznego cech emisji sejsmicznej, czyli: energii zjawisk  $E_k$  oraz odstępów czasu między zjawiskami  $u_k$ . Cechy te, będące zmiennymi losowymi, powiązane są liniową zależnością statystyczną [3], którą można wyrazić następująco:

$$\log \frac{E_k}{E_0} = \alpha \left( \frac{u_k}{u_0} - 1 \right) + \varepsilon_k \quad (1)$$

gdzie:

- $\alpha$  – współczynnik,
- $E_k$  oraz  $u_k$  – realizacje zmiennych losowych, czyli wartości, które przyjmują omawiane cechy,
- $E_0$  oraz  $u_0$  – wartości odniesienia,
- $\varepsilon_k$  – odchyłki losowe.

Ze statystyki wiadomo [14], że w tym przypadku rozkłady statystyczne tych cech opisywane są tym samym modelem. Proces pęknięcia jest jednorodny wówczas, gdy rozkład statystyczny cech emisji opisuje jednoparametrowy model wykładniczy [1]:

$$F(\zeta) = \begin{cases} 0 & \text{dla } \zeta_k < 0 \\ 1 - \exp[-\beta^{-1}\zeta_k] & \text{dla } \zeta_k \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

gdzie:

$\zeta_k$  – wartości, które przyjmuje zmienna losowa, w przypadku energii:

$$\zeta_k = \log \frac{E_k}{E_0},$$

w przypadku odstępów czasu:

$$\zeta_k = \frac{u_k}{u_0} - 1,$$

$E_k$  – energie zjawisk,

$u_k$  – odstęp czasu między kolejnymi zjawiskami,

$E_0$  oraz  $u_0$  – wartości odniesienia.

Dla większych wartości naprężeń obserwuje się tendencje wzrostowe rozmiarów pęknięć [10], a tym samym zwiększają się odstępy czasu między zjawiskami. Powoduje to niejednorodność w przebiegu procesów pęknięcia. W praktyce efekt niejednorodności wyraża się tym, że rozkłady statystyczne omawianych cech zależą od kilku parametrów. Procesy takie są określane mianem podwójnie stochastycznych strumieni zdarzeń albo procesami Coxa [11]. W przypadku emisji sejsmicznej rozkłady statystyczne omawianych cech opisuje model Weibull'a [13], [1]:

$$F(\zeta) = \begin{cases} 0 & \text{dla } \zeta_k < 0 \\ 1 - \exp[-\lambda^{-1} \cdot \zeta_k^\gamma] & \text{dla } \zeta_k \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

gdzie:

$\lambda$  oraz  $\gamma$  – parametry przy czym  $\lambda > 0$ ,  $\gamma > 0$ , w przypadku energii zjawisk parametr  $\gamma \geq 1$  natomiast w przypadku odstępów czasu między zjawiskami  $0 < \gamma \leq 1$ , reszta oznaczeń jak wyżej.

Gdy parametr  $\gamma = 1$ , wówczas model ten opisuje rozkład prawdopodobieństwa cech jednorodnego strumienia zdarzeń (2). Wynika stąd, że parametr  $\gamma$  może stanowić kryterium umożliwiające prowadzenie detekcji składowej rosnącej  $\{\gamma_t\}$  strumienia zdarzeń. Wartość oczekiwana  $M[\zeta] = m_\zeta$  cech emisji sejsmicznej wyraża się następująco:

$$m_{\zeta} = \lambda \gamma^{-1} \gamma^{-1} \cdot \Gamma(\gamma^{-1}) \quad (4)$$

gdzie:

$\Gamma(\bullet)$  jest funkcją gamma Eulera.

Ostatecznie należy stwierdzić, że rozkłady statystyczne obydwu omawianych cech emisji opisywane są modelem Weibull'a (3).

#### 4. FUNKCJA OPISUJĄCA PRZEBIEG ZAGROŻENIA WYSTĄPIENIEM WSTRZĄSÓW, MODELOWANA ZA POMOCĄ PARAMETRÓW HAZARDU

Analizując przebieg procesów pęknięcia górotworu istnieje możliwość oceny tendencji jego rozwoju w kierunku wzrastających rozmiarów, a tym samym wzrastających energii zjawisk. Mając to na uwadze opracowano model funkcji opisującej przebieg rozwoju zagrożenia wystąpieniem wstrząsów, której wartość jest przypisana do zadanego przedziału czasu  $T$  tzw. okna informacyjnego. Do wyznaczania tej funkcji konieczne jest określenie odpowiednich funkcjonałów pod warunkiem, że energia zjawisk w oknie  $T$  przekracza zadany poziom progowy  $Q_E$ . Postępuje się podobnie jak w metodzie hazardu sejsmicznego, oceniając funkcjonał, który określa prawdopodobieństwo przewyższenia, przez energię zjawisk, poziomu progowego  $Q_E$ . Przez sejsmologów prawdopodobieństwo to jest nazywane w metodzie hazardu „ryzykiem sejsmicznym” [12], [15]. W przypadku rozważanej emisji sejsmicznej, znajomość rozkładu statystycznego (3) umożliwia określenie tego prawdopodobieństwa przypisanego do okna  $T$  w następującej postaci [3]:

$$R(Q_E, T) = 1 - \exp[-N(Q_E, T)] \quad (5)$$

gdzie:

$N$  – jest liczbą wszystkich zjawisk maksymalnych zawartych w oknie  $T$ , natomiast  $N(Q_E, T)$  – jest liczbą zjawisk, których energia przekracza wartość progową  $Q_E$ .

Liczbę zjawisk, których energia przekracza wartość progową  $Q_E$ , można wyrazić następująco:

$$N(Q_E, T) = N[1 - F(Q_E)] \quad (6)$$

gdzie:

$F(Q_E)$  – jest prawdopodobieństwem opisywanym modelem (3).

Bardzo przydatny w praktyce jest funkcjonał określający wartość oczekiwaną liczby zjawisk sejsmicznych  $M[Q_E, T]$  przekraczających poziom  $Q_E$ , a mianowicie:

$$M(Q_E, T) = R(Q_E, T) \cdot N(Q_E, T) \quad (7)$$

Funkcja opisująca przebieg zagrożenia wystąpieniem wstrząsów, oznaczona symbolem  $FW_t(Q_E, T)$  została zdefiniowana w formie iloczynu  $M_t[Q_E, T]$ , opisywanego zależnością (7), oraz składnika  $\hat{N}_t(T)$  reprezentującego wartość oczekiwaną liczby wszystkich zjawisk maksymalnych zarejestrowanych w oknie  $T$ .

$$FW_t(Q_E, T) = M_t(Q_E, T) \cdot \hat{N}_t(T) \quad (8)$$

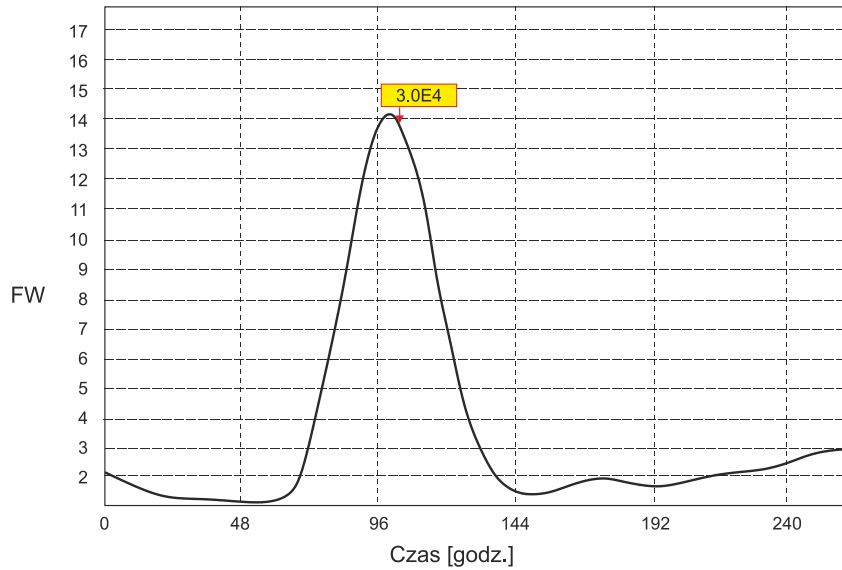
Składnik  $\hat{N}_t(T)$  jest estymowany na podstawie odstępów czasu między zjawiskami  $\zeta = U$ , dzieląc wielkość okna  $T$  przez wartość oczekiwaną  $m_u$  opisywaną zależnością (4) wówczas otrzymamy:

$$\hat{N}_t(T) = \frac{T}{\Gamma(\hat{\gamma}^{-1})} \hat{\gamma} \cdot \hat{\lambda}^{\frac{1}{\hat{\gamma}}} \quad (9)$$

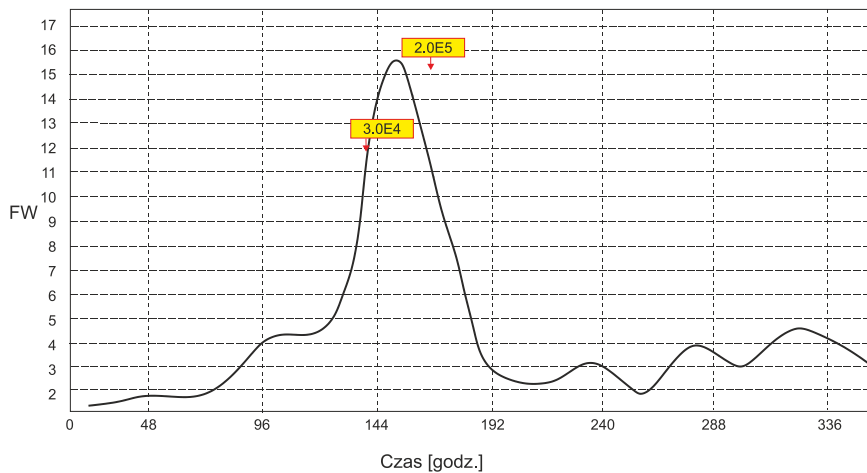
gdzie wartości z daszkami są estymatorami parametrów  $\hat{\lambda}$  i  $\hat{\gamma}$ , wyznaczonymi na podstawie odstępów czasu między zjawiskami zawartymi w oknie  $v$ .

Powyższe wielkości estymowane są w przesuwającym oknie informacyjnym  $T$  z krokiem  $d$ , uzyskując przebieg zmienności funkcji (8) zależny od czasu  $FW_t(Q_E, T)$ . Funkcja ta jest próbkowana równomiernie z krokiem  $d$ . Czas  $t$  jest czasem realnym, określony, jako moment prawego brzegu okna  $T$ , czyli wszystkie zjawiska zawarte w oknie  $T$  mają czasy wystąpienia mniejsze od  $t$ . Funkcja (8), w porównaniu z klasyczną definicją w formie prawdopodobieństwa  $R_t[Q_E, T]$ , charakteryzuje się znacznie większą rozdzielczością. Powoduje to składnik  $M_t[Q_E, T]$ , który jest monotonicznie rosnący, dla rosnących wartości argumentu, o wiele szybciej niż prawdopodobieństwo  $R_t[Q_E, T]$ . Natomiast drugi składnik tej funkcji  $\hat{N}_t(T)$ , reprezentujący aktywność emisji w oknie, opisuje jej spadek wywołany zatrzymaniem przemieszczeń w górotworze, poprzedzający momenty wystąpienia wstrząsów.

Śluszne jest stwierdzenie, że na drodze analizy statystycznej wartości maksymalnych zjawisk emisji sejsmoakustycznej metodą hazardu, możliwa jest identyfikacja procesów przebiegających w czasie poprzedzającym momenty wystąpienia wstrząsów. Procesy te to: narastanie rozmiarów zjawisk oraz efekt zatrzymania przemieszczenia w górotworze. Na rysunkach (1) i (2) zilustrowano przebiegi omawianej funkcji  $FW_t(Q_E, T)$ , estymowanej na podstawie emisji sejsmicznej rejestrowanej systemem sejsmoakustycznym.



Rys. 1 Przebieg funkcji ryzyka  $FW_i(Q_E, T)$  ilustrujący przykład, gdy moment wystąpienia wstrząsu  $t_{ws}$  pojawił się po jej maksimum



Rys. 2 Przebieg funkcji ryzyka  $FW_i(Q_E, T)$  obrazujący przykład, gdy moment wystąpienia wstrząsu  $t_{ws}$  pojawia się przed maksimum funkcji

Na rysunku 1 moment wystąpienia wstrząsu  $t_{ws}$  pojawił się po maksimum funkcji. Wynika stąd, że wstrząs ten spowodował odprężenie górotworu, a wartości funkcji obniżyły się do poziomu tła. Jest to klasyczny przykład zachowania się funkcji opisującej stany zagrożenia wystąpieniem wstrząsów.

Na rysunku 2 przedstawiono przykład, gdy moment wystąpienia wstrząsu  $t_{ws}$  pojawia się przed maksimum funkcji. Sytuacja taka ma miejsce wówczas, gdy wstrząs o stosunkowo małej energii nie spowodował odprężenia górotworu, i wartości funkcji dalej wzrastają. Dopiero wstrząs o dużej energii, który wystąpił po maksimum, spowodował odprężenie oraz jej spadek do poziomu tła. Na zakończenie należy wyjaśnić, że w odróżnieniu od przyjętego w sejsmologii „ryzyka

sejsmicznego”, które jest pojęciem globalnym, wprowadzone tutaj pojęcie „funkcji ryzyka” ma charakter lokalny i jest funkcją czasu realnego.

## 5. PODSUMOWANIE

Głównym celem pracy jest przedstawienie możliwości oceny momentu wystąpienia wstrząsu. Ocena ta prowadzona jest na podstawie funkcji ryzyka opisującej stan zagrożenia wystąpieniem wstrząsów. Do rozwiązania tego problemu zastosowano metodę hazardu, która jest oparta na analizie statystycznej energii zjawisk maksymalnych emisji sejsmicznej, czyli zjawisk

o maksymalnych energiach. Analiza hazardu prowadzona jest na podstawie danych pobieranych z przedziałów czasu (okien) o wielkości rzędu godzin. Przedstawiono model funkcji opisującej w czasie rzeczywistym przebieg zagrożenia wystąpieniem wstrząsów. Funkcja ta określona jest za pomocą parametrów hazardu wyznaczanych pod warunkiem, że energia zjawisk sejsmicznych przewyższa zadany poziom progowy. Jej wartości rosną monotonicznie wraz ze wzrostem naprężeń. Wynika stąd, iż momenty wystąpienia wstrząsów pojawiają się po jej maksimach pod warunkiem, że spowodują one odprężenie górotworu. W przypadku wzrostu wartości naprężeń funkcja ta charakteryzuje się przebiegiem ściśle rosnącym aż do momentu zakończenia procesu pękania. Moment ten może być interpretowany, jako czas wystąpienia wstrząsu, pod warunkiem, że spowodował on spadek naprężeń do poziomu poniżej wartości wytrzymałości krytycznej skał. Moment ten występuje zawsze po czasie, w którym funkcja osiąga maksimum. Mogą jednak wystąpić przypadki, w których wstrząsy pojawiają się przed maksimum omawianej funkcji. Ma to miejsce wówczas, gdy nie spowodują one odprężenia górotworu a wartości naprężeń dalej rosną, tym samym wzrastają wartości funkcji zagrożenia. Sytuacje te zostały zilustrowane na załączonych rysunkach (1) i (2), gdzie przedstawiono przykłady praktyczne obrazujące przebiegi funkcji ryzyka. Przedstawione w tej pracy wyniki wskazują, jak to zilustrowano na rysunkach (1) i (2), że zagrożenie zaczyna wzrastać od kilkunastu do kilkudziesięciu godzin przed momentem wystąpienia wstrząsu. Natomiast po odprężeniu - przez wstrząs, zagrożenie spada w ciągu kilku godzin do poziomu tła, a następny wstrząs nie może wystąpić aż do ponownego wzrostu wartości funkcji ryzyka. Teza ta potwierdza się w wynikach wielu prac między innymi: [3], [4], [5], [6], [7], [14] i [8]. Należy stwierdzić, że moment wystąpienia wstrząsu jest zmienną losową, a jego wartość, z określonym prawdopodobieństwem, jest zawarta w przedziale ufności. Zatem, odstęp pomiędzy czasem maksimum a momentem wystąpienia wstrząsu jest zależny od przedziału ufności oraz od wielkości okna. Na podstawie przedstawionych w tej pracy rozważań wynika, że jedynie na podstawie analizy słaboenergetycznej emisji sejsmicznej, rejestrowanej w systemie IN GEO, istnieje możliwość wiarygodnej oceny stanu zagrożenia tąpnięciami oraz oceny momentów wystąpienia wstrząsów. Reasumując należy stwierdzić, że badania w tym zakresie powinny być kontynuowane, ponieważ przyczynią się do poprawy bezpieczeństwa pracy oraz utrzymania ciągłości eksploatacji. Na podstawie analizy przebiegu omawianej funkcji ryzyka można również oceniać wielkość czasu wyczekiwania po wstrząsie.

#### Literatura

1. Cianciara A.: System of Monitoring Strong Tremors Occurrence on the Base of Analysis the Seismoacoustic Emission. Rozprawa doktorska, Biblioteka AGH Kraków, 2000.
2. Cianciara, A., Cianciara, B.: The issue of geodynamics processes identification caused by mine exploitation. *Geoinformatica Polonica*, 2004, 6, s. 17-32.
3. Cianciara, A., Cianciara, B., Takuska-Węgrzyn, E.: A Method of Evaluating the Threat of Tremors on the Basis of an Analysis of the Degree of Non-homogeneity of the Seismoacoustic Emission Process. *Archives of Mining Sciences*, 2004, 49(3), s. 405-416.
4. Cianciara, A., Cianciara, B.: Method of Evaluation of Mining Tremors Prediction on the Basis of the Analysis of Asymmetry of Seismoacoustic Signals Emission. *Archives of Mining Sciences*, 2005, 50(3), s. 317-326.
5. Cianciara, A., Cianciara, B.: The Meaning of Seismoacoustic Emission for Estimation of Time of Mining Tremors Occurrence. *Archives of Mining Sciences*, 2006, 51(4), s. 463-575
6. Cianciara A., Cianciara B., Isakow Z.: Sposób monitorowania zagrożenia tąpnięciami oparty na analizie emisji sejsmoakustycznej metodę hazardu sejsmicznego. *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, 2006, 10, s. 5-11.
7. Cianciara A., Cianciara B.: Method of predicting tremors on the basis of seismic emission registered in exploitation workings. *Tectonophysics*, 2008, 456(1), s. 62-66.
8. Cianciara, A.: Possibilities of Tremor Risk Level Predicting Based on the Rock Mass Cracking Process Analysis. *Archives of Mining Sciences*, 2010, 55(1), s. 115-122.
9. Goszcz A.: Elementy mechaniki skał oraz tąpnięcia w polskich kopalniach węgla i miedzi. PAN IGSMiE Kraków, 1999.
10. Jaeger C., Cook N.G.W.: *Fundamentals of Rock Mechanics*. London Chapman and Hall, 1969.
11. Kowalenko I. N., Kuzniecowa N. J., Szurienkowi W. M.: *Procesy stochastyczne*. PWN, Warszawa, 1989.
12. Lomnitz C.: *Global Tectonics and Earthquake Risk*. Elsevier, Amsterdam, 1974.
13. Lasocki S.: Weibull distribution as a model for sequence of seismic events induced by mining. *Acta Geophysica Polonica*, 1993, 41(2), s. 101-111.
14. Papoulis A.: *Prawdopodobieństwo, zmienne losowe i procesy stochastyczne*. WNT, Warszawa, 1972.
15. Silverman, B.W.: *Density estimation for statistics and data analysis*. Chapman and Hall, London, 1986.
16. Takuska-Węgrzyn, E.: Application of statistical methods for evaluation of rock-burst risks in copper ore mine conditions. *Archives of Mining Sciences*, 2008, 53(1), s. 23-30.

Artykuł powstał w wyniku realizacji projektu o akronimie IN GEO, pt. Innowacyjne metody i system do oceny zagrożenia tąpnięciami na podstawie probabilistycznej analizy procesu pęknięcia i geotomografii online, dofinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu Badań Stosowanych, nr umowy PBS2/B2/8/2013.

*BOGDAN CIANCIARA, dr hab. inż.*

*ZBIGNIEW ISAKOW, dr inż.*

*KAZIMIERZ SICIŃSKI, mgr inż.*

*{Zbigniew.Isakow,K.Sicinski}@ibemag.pl*  
*Institut Technik Innowacyjnych EMAG*  
*ul. Leopolda 31, 40-189 Katowice*

*ALEKSANDER CIANCIARA, dr inż.*

*alex@geol.agh.edu.pl*

*Katedra Geoinformatyki i Informatyki Stosowanej*  
*Akademia Górniczo Hutnicza*  
*al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków*