

Aleksander CIANCIARA

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

Matematyczny opis procesu pęknięcia górotworu na podstawie detekcji emisji sejsmicznej.

Słowa kluczowe

emisja sejsmoakustyczna, strumień zdarzeń, rozmiary zjawisk, pęknięcie skał, wstrząsy, zagrożenie tąpnięciami.

Streszczenie

W artykule tym przedstawiono modele matematyczne procesów pęknięcia górotworu, wywołanych wzrastającym stanem naprężeń, związanych z eksploatacją górnictwem, w kopalniach podziemnych. Procesy pęknięcia są modelowane w formie niejednorodnych, losowych strumieni zdarzeń, gdzie pod mianem zdarzeń określa się pęknięcia górotworu. Pęknięcie, jako takie, jest zjawiskiem które możemy obserwować tylko pośrednio. Identyfikacja tego procesu może być prowadzona na podstawie rejestrowanej emisji sejsmicznej. Zdarzenia reprezentowane są w formie zjawisk sejsmicznych, czyli sygnałów drgań rejestrowanych, odpowiednio rozmieszczonym w górotworze, układem czujników. Standardowo opis takich strumieni zdarzeń realizowany jest za pomocą dwu typów cech charakteryzujących pęknięcie skał, które podlegają obserwacji, a mianowicie: rozmiarów zdarzeń oraz odstępów czasu pomiędzy pojawianiem się kolejnych zdarzeń. Rozmiary zdarzeń oceniane są na podstawie energii matematycznej zjawisk sejsmicznych, natomiast omawiane odstępów czasu między kolejnymi zjawiskami podlegają bezpośrednim pomiarom. Omawiane cechy emisji mają charakter probabilistyczny i traktowane są jako zmienne losowe. W pracy przedstawiono modele rozkładów statystycznych tych cech oraz sposoby ich identyfikacji na podstawie rejestrowanego strumienia emisji. Stanowi to podstawę do badania procesów pęknięcia i umożliwia zastosowania praktyczne. Z pośród wielu możliwych zastosowań przedstawiono wykorzystanie tych rozwiązań do opracowania sposobów oceny stanu zagrożenia tąpnięciami w kopalniach podziemnych.

1. Wstęp

W kopalniach podziemnych, na skutek prowadzonej eksploatacji górnictwem, wytwarza się w ośrodku skalnym pole naprężeń, które po przekroczeniu wytrzymałości krytycznej powoduje pęknięcie skał. Jedną z podstawowych cech opisujących pęknięcie jest rozmiar pęknięć. Poszczególne pęknięcia na ogół są od siebie zależne i, pod względem wzrastających rozmiarów, układają się w ciągi zwane procesami pęknięcia (Jaeger, Cook, 1969). Rozwijające się procesy pęknięcia, w określonych sytuacjach, mogą prowadzić do wystąpienia wstrząsów. Pod mianem wstrząsów rozumie się pęknięcia o odpowiednio dużych rozmiarach. Wówczas, gdy pęknięcia mają odpowiednio duże rozmiary, czyli są wstrząsami, mogą spowodować

istotny spadek naprężeń, a taki wstrząs stanowi zakończenie procesu pękania. Jeżeli w górotworze ma miejsce dalszy wzrost naprężeń, wtedy pojawiają się nowe, niezależne od poprzednich procesy pękania. Uogólniając można stwierdzić, że przyczyną pękania górotworu jest wzrastający stan naprężeń, jednak jest on bezpośrednio nieobserwowalny. Uzasadnione jest odwrotne wnioskowanie, a mianowicie: procesy pękania odwzorowują stan naprężeń. Pęknięcie górotworu jest również bezpośrednio nieobserwowalne, jednak jest ono przyczyną powstawania drgań sejsmicznych, które są obserwowalne i można je rejestrować w postaci strumienia emisji sejsmicznej. Wynika stąd, że na tej podstawie można pośrednio, poprzez analizę pękania górotworu, wnioskować o stanie naprężeń. Można, w pewnym uogólnieniu, stwierdzić, iż emisja sejsmiczna stanowi kanał informacyjny o procesach geodynamicznych przebiegających w górotworze, (Cianciara, 1999). Wynika stąd zasada, że własności i prawa rządzące rozwojem pękania górotworu stanowią teoretyczną podstawę opracowywania sposobów oceny stanu zagrożenia tąpnięciami, a także predykcji wstrząsów. Zasada ta obowiązuje odnośnie wszystkich sposobów interpretacji emisji sejsmicznej, które są związane z tą problematyką. Dlatego bardzo istotnym zagadnieniem jest opracowanie modeli matematycznych opisujących procesy pękania. Na podstawie tych modeli będzie możliwe badanie struktury omawianych procesów, a to z kolei umożliwi opracowanie właściwych sposobów interpretacji danych pomiarowych.

W praktyce górniczej analiza pękania prowadzona jest pod różnymi aspektami, a mianowicie: badania rozwoju dynamiki rozmiarów pęknięć na podstawie analizy procesów pękania, lokalizacji i modelowania źródeł pęknięć, badania rozkładów źródeł pęknięć w przestrzeni i czasie. Modelowanie źródeł, ich lokalizacja oraz wyznaczanie energii, prowadzone jest dla silnych wstrząsów, czyli pęknięć o dużych rozmiarach, i wchodzi w zakres sejsmologii górniczej, (Gibowicz, 1978. Dubiński, 1995). Natomiast badanie rozkładów źródeł pęknięć w przestrzeni i czasie, jak również analiza procesów pękania prowadzona jest w zakresie sejsmoakustycznym. Emisja sejsmoakustyczna ze względu na możliwość detekcji zjawisk, czyli pęknięć, o małych a nawet bardzo małych rozmiarach, umożliwia śledzenie „korzeni” rozwijających się procesów pękania, które mogą prowadzić do wstrząsów (Cianciara i in., 2004, Cianciara, 2010). Również na podstawie analizy emisji sejsmoakustycznej jest możliwa ocena czasowego grupowania się zjawisk sejsmicznych (Takuska-Węgrzyn, 1998), oraz badanie stref przestrzennej koncentracji ich źródeł (Takuska-Węgrzyn, 2009). Z teorii geomechaniki wiadomo, że efekty te powinny występować przed momentami wystąpienia wstrząsów (Goszcz, 1999). Należy nadmienić, że emisja sejsmologiczna i sejsmoakustyczna ma tę samą strukturę i powinna być określana jednym wyrazem, a mianowicie emisją sejsmiczną. Różnica między nimi jest taka, iż emisja sejsmoakustyczna jest rejestrowana w szerszym niż sejsmologiczna paśmie częstotliwościowym. Do pomiarów emisji sejsmoakustycznej stosuje się układy czujników pomiarowych, dla których odległości pomiędzy nimi wynoszą kilkadziesiąt metrów, na ogół nie przekraczają stu metrów. Emisja taka odwzorowuje lokalnie procesy pękania, już od bardzo małych rozmiarów pęknięć. Natomiast w zakresie emisji sejsmologicznej rejestrowane są pęknięcia o dużych rozmiarach, czyli wstrząsy.

Procesy pękania, jak również wywołana nimi emisja sejsmiczna, są modelowane, jako losowe strumienie zdarzeń. Na podstawie analiz emisji generowanej w różnych warunkach geologiczno-górniczych stwierdzono, że omawiany strumień zdarzeń charakteryzuje się stosunkowo wysokim poziomem dyspersji. Wynika stąd, że interpretacja emisji jak również wszelkiego typu wnioskowanie powinno być prowadzone w dziedzinie probabilistycznej.

Jedynie takie podejście, do interpretacji emisji sejsmicznej, opartej na analizie procesów pękania, umożliwi uzyskanie satysfakcjonujących ocen stanu zagrożenia tąpnięciami czego wyrazem są np. wyniki przedstawione w pracach (Cianciara, 1999, Cianciara i in., 2005, Takuska-Węgrzyn, 2008). W pracach tych przedstawiono przykłady interpretacji prowadzonej w całości w dziedzinie probabilistycznej.

Wnioskowanie o przebiegu procesów pękania, jak już omawiano wyżej, prowadzone jest na podstawie analizy emisji sejsmicznej. Jednak emisja ta, rejestrowana w wyrobiskach górniczych, może zawierać znaczny poziom zjawisk niezwiązanych z pękaniem, jakimi są zakłócenia oraz zjawiska wywołane pracą urządzeń mechanicznych. Dlatego bardzo istotnym zagadnieniem jest opracowanie efektywnych sposobów ich eliminacji z rejestrowanego strumienia emisji. Omawiana eliminacja może odbywać się już na poziomie rejestracji, jak również w procesie przetwarzania, wykorzystując modele opisujące procesy pękania.

2. Modele matematyczne opisujące procesy pękania górotworu

Przedmiotem rozważań jest pęknięcie górotworu analizowane pod kątem rozwoju rozmiarów zjawisk, czyli pęknięć, wywołanych wzrastającym stanem naprężeń. Powstające pęknięcia, jak już wspomniano, mogą być zależne od siebie w czasie, układając się w ciągi zwane procesami pękania. Wówczas analiza tych procesów sprowadza się do badania ich dwóch podstawowych cech, czyli rozmiarów pęknięć oraz odstępów czasu między kolejnymi pęknięciami. Cechy te są zmiennymi losowymi i będą oznaczane symbolami E oraz U . Teoretycznie ilość cech opisujących te procesy mogłaby być jeszcze powiększona o inne parametry opisujące źródła pęknięć, takie jak: moment sejsmiczny, promień spektralny, czy też częstotliwość narożna itp. Z reguły parametry te są wyznaczane celem opisu wstrząsów wysokoenergetycznych, rejestrowanych w zakresie sejsmologicznym. Jednak ich praktyczna ocena w odniesieniu do pęknięć rejestrowanych w zakresie sejsmoakustycznym jest praktycznie niewykonalna. Zostanie dalej pokazane, że te dwie podstawowe cechy są wystarczające do opracowania sposobów oceny stopnia zagrożenia tąpnięciami oraz predykcji wstrząsów.

Opisywane tutaj procesy pękania mogą być modelowane matematycznie w formie losowych strumieni zdarzeń (Cianciara 1999). Zdarzenia, rozumiane jako poszczególne pęknięcia górotworu, reprezentowane są przez ich rozmiary. Na ogół strumienie te są niejednorodne, czyli podwójnie stochastyczne, zwane często procesami Coxa (Kowalenko i in., 1989, Cox 1955). Ze statystycznego punktu widzenia procesy te należy traktować jako półmartyngały (semimartyngały) (Lipcer, Szirajew, 1981), a czasy zakończenia procesów są określane mianem momentów Markowa (Wentzell, 1980). Z geomechanicznego punktu widzenia pojęcie półmartyngału należy interpretować, że w procesie pękania wzrastają rozmiary pęknięć w miarę wzrostu naprężeń w górotworze. Natomiast momenty Markowa określają czasy wystąpienia wstrząsów. Z teorii wynika (Wentzell, 1980), że każdy proces posiada swój moment Markowa (czas zakończenia) skończony lub nieskończony. W przypadku procesów pękania momenty te są czasami wystąpienia wstrząsów. Zgodnie z twierdzeniem Dooba (Lipcer, Szirajew, 1981), każdy półmartyngał można jednoznacznie, z dokładnością do równości stochastycznej, rozłożyć na dwie składowe, czyli: martyngał oraz proces o elementach rosnących (ściśle rosnący). Twierdzenie to zastosowane do analizy procesów pękania, można zapisać w formie następującego wyrażenia, a mianowicie:

$$x_t = m_t \pm y_t, \quad (t = 0, \dots, N). \quad (1)$$

W wyrażeniu tym x_t jest, półmartyngałem opisującym proces pęknięcia, natomiast m_t to martyngał reprezentujący składową jednorodną, a y_t określa składową ściśle rosnącą. Martyngał jest procesem, którego warunkowa wartość oczekiwana spełnia zależność: $M(m_t : \{m_s\}) = m_s$ dla $t \geq s$, co jest równoważne temu, że jego wartość oczekiwana jest stała, to znaczy $M[m_t] = M[m_0] = \text{constans}$ dla $(t = 0, \dots, N)$. Czynniki y_t jest rosnący, czyli jest składową niejednorodną procesu pęknięcia, spełnia on następujące warunki, a mianowicie: $0 < y_0 < y_1 < \dots < y_N$ dla niemalejących rodzin σ – ciał $\Sigma_0 \subset \Sigma_1 \subset \dots \subset \Sigma_N \subset \Sigma$, gdzie Σ jest rodziną zbiorów zdarzeń procesu pęknięcia, natomiast poszczególne Σ_k , $(k = 0, \dots, N)$ są jej podzbiarami. Z powyższego rozkładu wynika, że każdy proces pęknięcia można lokalnie, w oknie T , przedstawić w formie sumy procesów: jednorodnego (martyngału) oraz niejednorodnego, czyli procesu ściśle rosnącego, lub malejącego. Najczęściej w praktycznych zastosowaniach interesujący jest proces ściśle rosnący. W praktyce procesy te można badać na podstawie ich podstawowych cech, czyli rozmiarów zdarzeń i odstępów czasu między kolejnymi zdarzeniami.

Z matematycznego punktu widzenia strumień zdarzeń jest jednorodny wówczas, gdy ma on przyrosty niezależne i stacjonarne (Kowalenko i in., 1989). W przeciwnym przypadku strumień taki nazywamy niejednorodnym. Wynika stąd, że procesy pęknięcia są jednorodne, czyli są martyngałami, gdy ich rozkłady statystyczne omawianych cech zależą od jednego parametru. Natomiast z geomechanicznego punktu widzenia procesy te są jednorodne wtedy, gdy w górotworze nie występują wzrosty naprężeń. Wówczas są one jednorodnymi poissonowskimi strumieniami zdarzeń, a rozkłady statystyczne ich cech opisuje model wykładniczy (Cianciara, 2000):

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

gdzie:

w przypadku rozmiarów $\zeta = \log \frac{\rho}{\rho_0}$, ρ rozmiar zjawiska,

w przypadku odstępów czasu $\zeta = \frac{u}{u_0} - 1$,

u odstęp czasu między kolejnymi zjawiskami,

ρ_0 , oraz u_0 , wartości odniesienia.

W przypadku, gdy następują wzrosty stanu naprężeń, wówczas zgodnie z teoriami geomechanicznymi, (Jaeger, Cook; 1969) obserwuje się tendencje wzrostowe rozmiarów pęknięć, a tym samym zwiększają się odstęp czasu między zjawiskami. Powoduje to pojawianie się elementów niejednorodnych w przebiegu procesów pęknięcia, które są opisywane przez składową ściśle rosnącą $\{y_t\}$. Z praktycznego punktu widzenia efekt niejednorodności wyraża się tym, że rozkłady statystyczne omawianych cech procesu pęknięcia zależą od kilku parametrów, co najmniej dwóch. Procesy takie są określane mianem podwójnie

stochastycznych strumieni zdarzeń, albo procesami Coxa (Kowalenko i in., 1989), a ich rozkłady statystyczne opisuje model Weibull'a (Cianciara, 2000).

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

gdzie:

β oraz γ – parametry przy czym $\beta > 0, \gamma > 0$, w przypadku rozmiarów zjawisk parametr $\gamma \geq 1$, natomiast w przypadku odstępów czasu między zjawiskami $0 < \gamma \leq 1$.

Przypadek, gdy $\gamma = 1$, wówczas model ten opisuje rozkład prawdopodobieństwa cech jednorodnego strumienia zdarzeń, który jest martyngałem. Wynika stąd, że parametr γ może stanowić kryterium umożliwiające prowadzenie detekcji składowej rosnącej $\{y_t\}$ strumienia zdarzeń.

Wartość oczekiwana $M[\zeta] = \vartheta_\zeta$ cech procesu pęknięcia wyraża się następująco:

$$\vartheta_\zeta = \beta^{-\gamma^{-1}} \Gamma(\gamma^{-1} + 1) \quad (4)$$

Natomiast dyspersję σ_ζ opisuje zależność:

$$\sigma_\zeta = \beta^{-\gamma^{-1}} \left[\Gamma\left(\frac{2}{\gamma} + 1\right) - \Gamma\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

gdzie:

$\Gamma(\bullet)$, funkcja gama Eulera

Z powyższych stwierdzeń, a w szczególności z zależności (5) wynika, że procesy pęknięcia charakteryzują się dużą dyspersją σ_ζ , która jest porównywalna z wartością oczekiwaną m_ζ . W związku z tym nasuwa się pytanie, jak badać procesy pęknięcia? Bowiem wiadomo z zakresu probabilistyki, że w warunkach wysokiej dyspersji (dużej losowości) nie jest możliwe prowadzenie dokładnych analiz i wyciąganie zbyt szczegółowych wniosków. Zdaniem autora jest jednak możliwe śledzenie rozwoju tendencji rozmiarów zjawisk omawianego strumienia zdarzeń (Cianciara, 2010). Przyjęto, iż miarą rozmiarów zjawisk jest ich wartość oczekiwana θ_ζ opisywana zależnością (4). W efekcie zagadnienie sprowadza się do badania przebiegu czasowej tendencji rozwoju wartości oczekiwanej cech emisji $\vartheta_\zeta(t)$.

3. Praktyczne wykorzystanie opracowanych modeli do predykcji zagrożenia tąpnięciami

Wiadomo, że procesy pęknięcia nie są bezpośrednio obserwowalne, jednak są one przyczyną powstawania w górotworze drgań rejestrowanych w formie emisji sejsmicznej. Emisja

sejsmiczna stanowi odwzorowanie procesów pęknięcia w formie „iniekcji”. Oznacza to, że poszczególne zjawiska procesu pęknięcia (pęknięcia) odwzorowywane są w postaci sygnałów emisji x_t . Przyjmuje się, że rozmiary zjawisk ρ oceniane są w formie energii matematycznej sygnałów $\rho = E_x$, czyli kwadratu ich normy $E_x = \|x_t\|^2$, natomiast odstępy czasu między zjawiskami $u_k, (k = 1, 2, \dots)$ określone są jako różnice czasów wystąpienia kolejnych sygnałów, czyli $u_k = \tau_k - \tau_{k-1}$, gdzie τ_l mogą być czasami pierwszych wstąpień sygnałów. Wynika stąd, iż przedstawione wyżej modele opisujące procesy pęknięcia, a w szczególności rozkłady statystyczne ich cech, opisują również, generowany nimi, strumień emisji sejsmicznej. Dlatego wyniki interpretacji, uzyskane na drodze analizy emisji, mogą być również odnoszone do opisu procesów pęknięcia, co umożliwi ich realne badanie. Na podstawie rejestrowanej emisji sejsmicznej prowadzona jest identyfikacja modeli opisujących rozkłady statystyczne procesów pęknięcia, oraz ich weryfikacji. W efekcie umożliwia to estymację wartości oczekiwanej $\hat{\nu}_\zeta(t)$, dla omawianych tutaj cech, jako funkcji czasu. Funkcje te stanowią reprezentacje przebiegu składowej rosnącej y_t , która z kolei może być wykorzystana do oceny przebiegu tendencji rozwoju procesów pęknięcia. Z geomechanicznego punktu widzenia składowa ta odwzorowuje stany wzmożonych naprężeń, co umożliwia jej wykorzystanie do predykcji wstrząsów. Należy podkreślić, że omawiana emisja, rejestrowana w wyrobiskach górniczych, może zawierać również znaczny poziom zakłóceń oraz sygnałów niezwiązanych z procesem pęknięcia skał. Dlatego bardzo istotnym zagadnieniem jest opracowanie sposobów wydzielenia (filtracji), z ogólnego pola emisji, składowej generowanej procesami pęknięcia. Do tego, aby na podstawie przedstawionej wyżej koncepcji uzyskać pozytywne wyniki praktyczne konieczne jest opracowanie sposobów wydzielenia, z rejestrowanego strumienia emisji, sygnałów związanych z pękaniem górotworu. Wydzielenie takie, które właściwie jest filtracją mającą na celu ekstrakcję informacji użytecznej, można realizować już w trakcie pomiaru emisji, prowadząc jej rejestrację w układzie wielo czujnikowym. Możliwa jest wówczas detekcja zjawisk na podstawie sygnałów, które zostały zarejestrowane na kilku czujnikach, co najmniej dwóch. Pozwala to na wyeliminowanie zakłóceń oraz znaczną część zjawisk niezwiązanych z pękaniem. Dalsza ekstrakcja informacji użytecznej realizowana jest już na poziomie przetwarzania. Możliwe jest zastosowanie wnioskowania na podstawie wartości maksymalnych, w rozważanym przypadku analizie podlegają zjawiska o maksymalnych rozmiarach. Zjawiska te wyszukiwane są w oknach czasowych δ o długości zapewniającej uzyskiwanie odpowiedniej liczebności zjawisk, która jest niezbędna do prowadzenia analiz statystycznych. Długość okna uzależniona jest od aktywności emisji. Zastosowanie wartości maksymalnych poprawia efektywność uzyskiwanych ocen, ponieważ ulega zmniejszeniu dyspersja omawianych cech pęknięcia, co wynika z zależności (5). Należy wspomnieć, że na podstawie analizy wartości maksymalnych oparta jest metoda „hazardu sejsmicznego”. Jej wersja dostosowana do analizy strumienia emisji sejsmoakustycznej została przedstawiona w pracy (Cianciara, i in., 2004). Przedstawione sposoby jeszcze nie gwarantują pełnej detekcji zjawisk związanych z pękaniem, czyli eliminacji ze strumienia emisji czynników niepożądanych. Dalsze ich usuwanie ma miejsce w procesie estymacji rozkładów statystycznych omawianych cech, ponieważ ich formę określają odpowiednie modele opisujące pęknięcie. Dalej poddając analizie model rozkładu

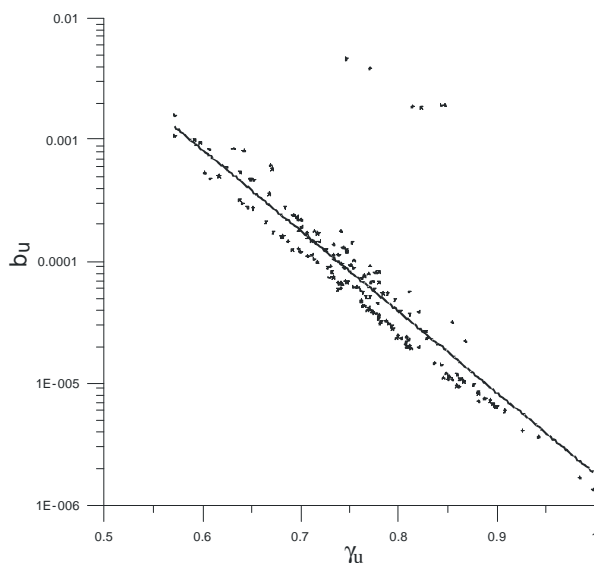
statystycznego cech emisji (3), stwierdzono, że opisujące go parametry powiązane są następującą zależnością (Cianciara, 2000):

$$\log \beta = a - b\gamma + \varepsilon \quad (6)$$

gdzie:

β , γ parametry modelu Weibull'a,
 a oraz b współczynniki opisujące omawianą zależność,
 ε są odchyłkami losowymi.

Zależność (6) można teoretycznie uzasadnić tym, że wynika ona z prawa Gutenberga-Richtera (Gutenberg, Richter, 1976) ponieważ parametr β reprezentuje aktywność emisji, natomiast parametr γ opisuje stopień niejednorodności, czyli stopień powiększania się rozmiarów zjawisk, a tym samym jest on proporcjonalny do współczynnika Gutenberga-Richtera. Zależność ta jest słuszna wówczas, gdy opisuje emisję, która odwzorowuje procesy pękania. Może ona dodatkowo stanowić kryterium do eliminacji zakłóceń i zjawisk niezwiązanych z pękaniem. Przykładowy wykres obrazujący zależność (6), wiążącą parametry rozkładu Weibull'a (3), przedstawiono na rysunku 1. Na rysunku tym wykreślono linię regresji.



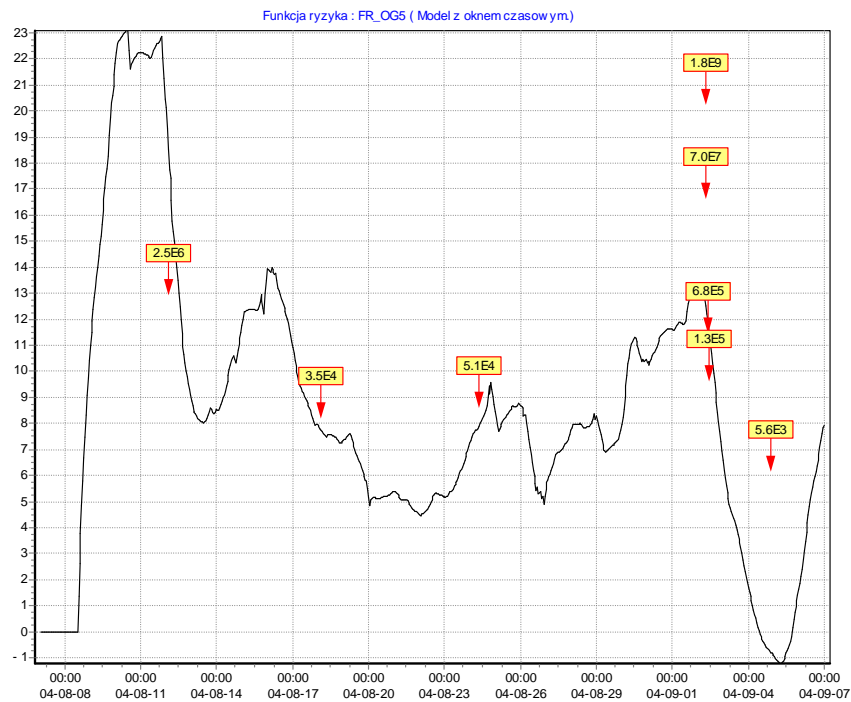
Rys. 1. Wykres obrazujący zależność parametrów γ_u od b_u opisywaną modelem Weibull'a

Proces eliminacji polega na tym, że usuwa się przypadki, dla których punkty o współrzędnych $(\log \beta, \gamma)$ leżą w płaszczyźnie regresji na zewnątrz przedziału ufności. Tylko tak odfiltrowany (oczyszczony) materiał pomiarowy może zapewnić wysoką efektywność wnioskowań, które wynikają z analizy procesów pękania, prowadzonej w dziedzinie probabilistycznej. Na podstawie prowadzonych długoletnich badań związanych z tą problematyką, można stwierdzić, że tylko wnioskowanie o procesach pękania prowadzone w

A. CIANCIARA - Matematyczny opis procesu pęknięcia górotworu na podstawie detekcji...

dziedzinie probabilistycznej charakteryzuje się odpowiednią efektywnością. W szczególności odnosi się to do sposobów interpretacji emisji sejsmoakustycznej rejestrowanej w kopalniach podziemnych. Jako przykład wykorzystania omawianych tutaj modeli, przedstawiono sposób oceny stanu zagrożenia tąpnięciami oparty na analizie procesów pęknięcia. W przypadku tej oceny analiza prowadzona jest na podstawie emisji rejestrowanej w oknie czasowym T , którego wielkość głównie uzależniona jest od aktywności emisji. W oknie tym prowadzona jest identyfikacja rozkładów statystycznych obydwu omawianych cech, a następnie estymowane są ich wartości oczekiwane ϑ_D i ϑ_U oraz dyspersje σ_D i σ_U . Następnie okno to przesuwane jest w czasie z ustalonym krokiem Δ i powtarzane są cyklicznie obliczenia. Uzyskuje się w ten sposób przebiegi omawianych wartości oczekiwanych i dyspersji w formie szeregów czasowych. Na podstawie tych przebiegów wyznaczana jest tendencja rozwoju rozmiarów zjawisk stosując filtrację optymalną, (Anderson, Moore, 1979). Należy dodać, że z rejestrowanego strumienia emisji prowadzone jest wydzielanie informacji użytecznej tak, jak to jest przedstawione w tekście. W efekcie tej interpretacji uzyskuje się dwa wykresy, które faktycznie opisują ten sam przebieg tendencji rozmiarów pęknięć. Wynika to stąd, że rozmiary zjawisk w procesie pęknięcia są powiązane jednoznacznie zależnością z odstępami czasu między kolejnymi zjawiskami (Cianciara, 2000).

Na rysunku 2 przedstawiono przykładowy przebieg tendencji rozmiarów zjawisk procesu pęknięcia w okresie obejmującym moment wystąpienia wstrząsu.



Rys. 2. Przebieg tendencji rozwoju rozmiarów zjawisk procesu pęknięcia w okresie otaczającym momenty wystąpienia wstrząsów.

4. Podsumowanie

Pęknięcia górotworu są zjawiskami, do których również należą wstrząsy. Na ogół pęknięcia wywołane są zwiększającym się stanem naprężeń i są ze sobą powiązane, układając się w ciągi o wzrastających rozmiarach, zwane procesami pękania. W przypadkach, gdy wstrząs spowoduje spadek naprężeń, wówczas stanowi on zakończenie procesu pękania. Jeżeli wystąpią takie warunki, że ponownie wzrasta naprężenie, wtedy wytwarzają się nowe procesy pękania. Własności tych procesów stanowią podstawę, przedstawionego w tej pracy, wnioskowania o stanie zagrożenia tąpniętami. Ogólnie należy stwierdzić, że jakiegokolwiek rozwiązania z zakresu problematyki związanej z oceną stanu zagrożenia tąpniętami, czy też predykcją wstrząsów, bazują na własnościach opisujących pęknięcie. Celem efektywnego wnioskowania, w zakresie tej problematyki, opracowano model matematyczny opisujący omawiane procesy pękania, który umożliwi badanie ich struktury. Wiadomo, iż pęknięcie jest zjawiskiem losowym, dlatego model tych procesów jest opisywany w formie losowego strumienia zdarzeń. Analizując strukturę tego modelu stwierdzono, że procesy pękania charakteryzują się wysokim poziomem dyspersji, co uniemożliwia zbyt szczegółową ich analizę. Wynika stąd, że każde wnioskowanie, w zakresie tej problematyki, powinno być realizowane w dziedzinie probabilistycznej, a interpretacja nie jest prowadzona bezpośrednio na danych pomiarowych, lecz na estymatorach ich parametrów statystycznych. Jako przykład może posłużyć metoda „hazardu sejsmicznego”, gdzie analiza oparta jest na badaniu parametrów hazardu. Z zawartych w tej pracy rozważaniach wynika, że interpretacja procesów pękania, w aspekcie oceny stanu zagrożenia tąpniętami, czy też predykcji wstrząsów, może być racjonalnie prowadzona na podstawie badania tendencji rozwoju rozmiarów zjawisk. Bardziej szczegółowe wnioskowanie jest mało efektywne, co wynika z wysokiego poziomu dyspersji procesu pękania. Okazuje się, że badanie przebiegu tendencji rozwoju rozmiarów zjawisk (pęknięć) jest wystarczające do uzyskiwania efektywnych ocen w rozważanej problematyce.

Kanałem niosącym informację służącą do badania procesów pękania jest emisja sejsmiczna, która stanowi ich jednoznaczne odwzorowanie w formie iniekcji. Zjawiska emisji określane na podstawie rejestrowanych sygnały odwzorowują poszczególne pęknięcia. Rejestrowana emisja stanowi podstawę do identyfikacji modeli opisujących procesy pękania, a w szczególności umożliwia estymację parametrów opisujących rozkłady statystyczne rozmiarów zjawisk tych procesów, czyli pęknięć. Rozmiary pęknięć są, w sensie statystycznym, proporcjonalne do energii matematycznej zjawisk emisji, oraz odstępów czasu między kolejnymi zjawiskami emisji. Dlatego analiza statystyczna, prowadzona na podstawie tych cech emisji, daje wystarczająco efektywne, oceny rozwoju tendencji rozmiarów zjawisk procesu pękania. Stanowi to podstawę do wnioskowania o stanie zagrożenia tąpniętami na drodze analizy statystycznej zjawisk strumienia emisji sejsmoakustycznej. Na rysunku (2) przedstawiono przykład ilustrujący przebieg, omawianej tendencji rozwoju rozmiarów zjawisk procesu pękania. Na rysunku tym zaznaczono momenty wystąpienia wstrząsów, oraz ich energie.

Literatura

- [1] Andersen, B. D., 1979, Moore, J. B., Optimal filtering. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- [2] Cianciara B., 1999: Emisja sejsmiczna jako nośnik informacji o rozwoju procesu pęknięcia górotworu. Geoinformatica Polonica nr.1, s. 37-44 Prace Komisji Geoinformatyki, PAU, Kraków.
- [3] Cianciara A., 2000: System monitorowania zagrożenia wystąpieniem silnych wstrząsów w oparciu o analizę emisji sejsmoakustycznych. Rozprawa doktorska Biblioteka Główna AGH. Kraków.
- [4] Cianciara A., Cianciara B., 2004, Zagadnienia identyfikacji procesów geodynamicznych wywołanych eksploatacją górnictwem. The issue of geodynamics processes identification caused by mine exploitation. Geoinformatica Polonica no 6. PAU Kraków
- [5] Cianciara A., Cianciara B., Takuska-Węgrzyn E., 2004. 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, vol.49, I 3, str. 405-416.
- [6] Cianciara A., 2010, Possibilities of tremor risk level predicting based on the rock mass cracking process analysis, Archives of Mining Sciences, vol. 55, I 1, str. 115-122.
- [7] Dubiński J., 1995, Metody obliczania energii sejsmicznej wstrząsów górniczych, „Wstrząsy górnicze – mechanizm, lokalizacja i energia”. Szkoła Eksploatacji Podziemnej,
- [8] Gibowicz, 1989 - Mechanizm ognisk wstrząsów górniczych. Publ. Inst. of Geoph. Z.M-13 (221).
- [9] Goszcz A., 1999 : Elementy mechaniki skał oraz tąpnięcia w polskich kopalniach węgla i miedzi. PAN IGSMiE Kraków.
- [10] Jaeger C., Cook N.G.W. 1969: Fundamentals of Rock Mechanics. London Chapman and Hall.
- [11] Kowalenko et al., 1981 - Procesy stochastyczne - Przewodnik, PWN
- [12] Lipcer, R., Sz., Szirjajew, A., N., 1981. Statystyka procesów stochastycznych. PWN Warszawa
- [13] Takuska-Węgrzyn, E., 2009. Badanie stref koncentracji źródeł emisji sejsmoakustycznej w okresach poprzedzających momenty wystąpienia silnych wstrząsów. Zeszyty Naukowe AGH, Geologia, Tom 35, Zeszyt 2/1, str. 529-534, Kraków.
- [14] Takuska-Węgrzyn, E., 2008 Application of statistical methods for evaluation of rock-burst risks in copper ore mine conditions. Archives of Mining Sciences, vol.53, No 1, p. 23-30.
- [15] Takuska-Węgrzyn, E., 1998. A method of the therat caused by bumps and based on the grouping of seismo-acoustic phenomena. Zeszyty Naukowe AGH, Geologia, Tom 24 Zeszyt 2, Kraków.
- [16] Wencel, A., D., 1980. Wykłady z teorii procesów stochastycznych. PWN Warszawa.