

Stanisław KRZEMIEN

Instytut Organizacji i Ekonomiki Górnictwa
Politechnika Śląska

WYKORZYSTANIE PROCESÓW MARKOWA DO PROGNOZOWANIA STANÓW NIEBEZPIECZNYCH W WYROBISKACH GÓRNICZYCH ZAGROŻONYCH TĄPIANIAMI

Streszczenie. W artykule przedstawiono propozycję wykorzystania punktowego procesu Markowa do wyznaczenia prawdopodobieństwa znajdowania się wyrobiska (obiektu górniczego) w jednym z możliwych stanów zagrożenia tąpnięciami. Przyjęto, że modelem matematycznym zagrożenia tąpnięciem dowolnego obiektu podziemnego jest dwustanowy proces Markowa $\{X_t, t \geq 0\}$ utworzony ze zmiennych losowych $X_t = 0$, gdy górotwór jest nie przygotowany do tąpnięcia oraz $X_t = 1$, gdy górotwór jest przygotowany do tąpnięcia. Jako kryteria przygotowania górotworu do tąpnięcia przyjęto identyfikatory cech zjawisk zagrożeniowych, zwanych zwiastunami lub prekursorami niebezpiecznych wydarzeń, które mogą być uzyskane metodami mikrosejsmologiczną, sejsmoakustyczną, wiertniczą lub innymi metodami obserwacyjno-doświadczalnymi. Przyjęto, że prawdopodobieństwa znajdowania się górotworu w stanie $i = 0, 1$ są rozwiązaniem równań Kołmogorowa.

Rozwiązanie tych równań przy zadanych warunkach brzegowych pozwala na oszacowanie prawdopodobieństwa znajdowania się analizowanych obiektów w stanach zdolności do tąpnięcia lub silnego wstrząsu. Zamieszczony przykład dotyczy prognozy stanu zagrożenia opartej na obserwacji identyfikatorów aktywności mikrosejsmologicznej w KWK "Pstrowski".

1. WSTĘP

U podstaw teorii powstawania wypadków [7] lub szerzej: teorii bezpieczeństwa pracy [1], leży założenie, że środowisko pracy lub jego dowolny element muszą osiągnąć wystarczający stan gotowości energetycznej, aby pod wpływem pewnego czynnika wyzwalającego, zwanego czynnikiem wymuszającym lub inicjałem, zaszło niebezpieczne wydarzenie (zdarzenie zagrożeniowe). Inicjałami mogą być uszkodzenia zaistniałe w systemie lub błędy popełnione przez człowieka.

Systemowy opis podziemnego środowiska pracy, rozumiany jako zbiór obiektów (wraz z ich otoczeniem) oraz występujących w nich relacji (interakcji), przedstawiono w opracowaniach [3], [8]. Systematykę zagrożeń górniczych i związaną z nimi systematykę potencjalnych niebezpiecznych wydarzeń zawierają między innymi prace [2], [9], [10], przy czym podział o przydatnym ujęciu w badaniach systemowych zawierają prace [4], [6], [7].

Jedną z wyodrębnionych w tym podziale grup zagrożeń górniczych stanowią zagrożenia litosferyczne, ściśle związane z otoczeniem skalnym wyrobisk górniczych (górotworem). Zachodzące w górotworze procesy fizykochemiczne mają zróżnicowane przebiegi, a zwłaszcza złożone mechanizmy aktywacji. Zdecydowana większość parametrów opisujących te procesy ulega zmianom z upływem czasu, przy czym zmiany te mają charakter losowy, stochastyczny i są zależne od nielosowego parametru t [4].

Przebieg zasadniczych zdarzeń zachodzących w górotworze nie jest możliwy do obserwacji bezpośrednich z udziałem zmysłów człowieka. Możemy jedynie przewidywać ich przebieg w sposób pośredni, badając pewne cechy tych zdarzeń na podstawie modeli fizycznych, a także modeli informacyjnych rejestrujących i wykorzystujących identyfikatory cech tych zdarzeń.

W dalszym ciągu rozważań identyfikatory cech zdarzeń będziemy nazywać zwiastunami lub prekursorami niebezpiecznych wydarzeń. Prekursory zagrożeń litosferycznych wymienione są w pracach [2], [4], [10]. I tak np. dla zagrożenia tapaniami zwiastunami niebezpiecznych wydarzeń są między innymi:

- zmiany aktywności sejsmicznej, której miarą jest intensywność impulsów sejsmicznych w określonych klasach energetycznych,
- energia wstrząsów,
- zmiany odległości i położenia ognisk wstrząsów,
- zmiany prędkości rozchodzenia się fal,
- zatrzymanie się konwergencji skał stropu i spagu,
- zmiany ilości i jakości zwiercin oraz głębokości zakleszczenia się wiertła itp.

Pośrednie wnioskowanie o stanie bezpieczeństwa obiektu górniczego oparte na badaniach zmian zwiastunów (prekursorów) zagrożeń jest jedną z metod diagnozy zagrożeniowej obiektu. Ostatecznym celem tej diagnozy jest umożliwienie podjęcia odpowiednich działań korekcyjno-profilaktycznych w zagrożonym obiekcie.

Metoda diagnozy zagrożenia bezpieczeństwa obiektu jest zbliżona do tej, jaką stosuje lekarz, oceniając stan zdrowia chorego (ocenia przebieg zjawisk wewnętrznych między innymi przez ocenę symptomów zewnętrznych). Diagnoza zagrożenia systemu obiektów wymaga budowy modelu systemu tego obiektu, a w tym:

- opisu własności tego obiektu, np. w ujęciu statycznym i dynamicznym,
- wyboru matematycznych metod diagnozy, np. metod heurystycznych, metod empirycznych (indukcyjnych),
- określenia rodzaju zbioru czynników charakteryzujących obiekt oraz związanego z tym wyboru modelu logiczno-matematycznego: deterministycznego lub probabilistycznego (losowego).

Model systemu zagrożenia bezpieczeństwa obiektu wraz z algorytmem postępowania diagnostycznego przedstawiają prace [3], [5].

2. PROBABILISTYCZNY-- MARKOWSKI MODEL PROGNOZY ZAGROŻENIA TĄPIANIAMI

Potraktujmy informacje o parametrach charakteryzujących przebieg zdarzeń litosferycznych jako strumienie losowe, które można rozpatrywać w dwojakim ujęciu:

1) badając rozkład liczb zdarzeń (zmian stanu procesu), które realizują się w danym odcinku czasu położonym dowolnie w odniesieniu do chwili początkowej,

2) badając rozkład długości odcinków pomiędzy chwilami, w których występują zdarzenia (zmiany stanu procesu).

Przyjmijmy za punkt wyjścia drugie ujęcie i zastosujemy przedstawione w pracy [4] elementy teorii procesów Markowa. Celem takiego postępowania jest możliwość wyznaczenia prawdopodobieństwa znajdowania się zagrożonego obiektu w jednym z wielu możliwych stanów zagrożenia.

Zalóżmy, że modelem matematycznym zagrożenia tąpnięciem dowolnego obiektu podziemnego może być dwustanowy proces Markowa:

$$\{x_t, \quad r \geq 0\} \quad (1)$$

utworzony ze zmiennych losowych:

$$x_t = \begin{cases} 0, & \text{gdy górotwór jest nie przygotowany do tąpnięcia} \\ 1, & \text{gdy górotwór jest przygotowany do tąpnięcia} \end{cases}$$

Za kryteria przygotowania górotworu do tąpnięcia przyjmijmy identyfikatory uzyskane:

- metodą mikrosejsmologiczną,
- metodą sejsmoakustyczną,
- metodą sondażu wiertniczego.

Przyjmijmy, że prawdopodobieństwa znajdowania się górotworu w stanie $i = 0, 1$ są rozwiązaniem równań Kołmogorowa 4 danych w postaci:

$$P'_0(t) = \frac{1}{\tau} P_0(t) + \frac{1}{\nu} P_1(t) \quad (2)$$

$$P'_1(t) = \frac{1}{\tau} P_0(t) - \frac{1}{\nu} P_1(t) \quad (3)$$

Przyjmując, że w chwili początkowej górotwór nie był zdalny (przygotowany) do tąpnięcia, rozwiązania powyższego układu równań różniczkowych otrzymujemy przeprowadzając następujące obliczenia:

Różniczkując (2) otrzymujemy:

$$\frac{d^2 P_0(t)}{dt^2} = \frac{1}{\tau} \frac{d P_0(t)}{dt} + \frac{1}{\nu} \frac{d P_1(t)}{dt} \quad (4)$$

Z równania (3) obliczamy $P_1(t)$

$$P_1(t) = \nu \left(\frac{d P_0(t)}{dt} + \frac{1}{\tau} P_0(t) \right) \quad (5)$$

i wstawiamy do równania (2)

$$\begin{aligned} \frac{d P_1(t)}{dt} &= \frac{1}{\tau} P_0(t) - \frac{1}{\nu} \left(\frac{d P_0(t)}{dt} + \frac{1}{\tau} P_0(t) \right) = \\ &= \frac{1}{\tau} P_0(t) - \frac{d P_0(t)}{dt} - \frac{1}{\tau} P_0(t) = - \frac{d P_0(t)}{dt} \end{aligned} \quad (6)$$

Wstawiamy (6) do równania (4)

$$\begin{aligned} \frac{d^2 P_0(t)}{dt^2} &= - \frac{1}{\tau} \frac{d P_0(t)}{dt} + \frac{1}{\nu} \left(- \frac{d P_0(t)}{dt} \right) = \\ &= - \frac{1}{\tau} \frac{d P_0(t)}{dt} - \frac{1}{\nu} \frac{d P_0(t)}{dt} = - \frac{d P_0(t)}{dt} \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\nu} \right) \end{aligned}$$

Otrzymaliśmy równanie różniczkowe rzędu 2 (o stałych współczynnikach)

$$\frac{d^2 P_0(t)}{dt^2} + \frac{d P_0(t)}{dt} \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\nu} \right) = 0 \quad (7)$$

Rozwiązujemy równanie (7), za pomocą równania charakterystycznego

$$k^2 + \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\nu} \right) k = 0$$

$$k \left[k + \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\nu} \right) \right] = 0$$

$$k_1 = 0 \quad k_2 = - \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\nu} \right)$$

Rozwiązanie ma postać:

$$P_0(t) = C_1 + C_2 e^{-(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\nu})t} \quad (8)$$

Korzystamy z warunków początkowych:

$$P_0(0) = p_0 = 1$$

$$P_1(0) = p_1 = 0$$

Ponieważ:

$$\sum_{i=1}^n P_i = 1$$

$$P_0(0) = C_1 + C_2 = 1 \quad C_2 = 1 - C_1$$

$$P_1(t) = \nu \left(\frac{d P_0(t)}{dt} + \frac{1}{\tau} P_0(t) \right)$$

$$\frac{d P_0(t)}{dt} = -C_2 \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\nu} \right) e^{-(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\nu})t}$$

$$P_1(t) = \nu \left[-C_2 \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\nu} \right) e^{-(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\nu})t} + \frac{1}{\tau} (C_1 + C_2) e^{-(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\nu})t} \right]$$

$$P_1(0) = \nu \left[-C_2 \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\nu} \right) + \frac{1}{\tau} (C_1 + C_2) \right] = 0$$

$$C_1 + C_2 = 1$$

Rozwiązujemy układ równań:

$$\begin{cases} C_1 = 1 - C_2 \\ -C_2 \left(\frac{\nu}{\tau} + 1 \right) + \frac{\nu}{\tau} = 0 \\ C_2 \left(\frac{\nu}{\tau} + 1 \right) = \frac{\nu}{\tau} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} C_2 = \frac{\nu}{\nu + \tau} \\ C_1 = 1 - \frac{\nu}{\nu + \tau} = \frac{\tau}{\nu + \tau} \end{cases} \quad (10)$$

Po podstawieniu (10) do (8) otrzymujemy:

$$P_0(t) = \frac{\tau}{\tau + \nu} + \frac{\nu}{\tau + \nu} \exp \left[- \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\nu} \right) t \right]$$

Z własności równania Kołmogorowa $P_1(t) = 1 - P_0(t)$ mamy:

$$\begin{aligned} P_1(t) &= 1 - \frac{\tau}{\tau + \nu} - \frac{\nu}{\tau + \nu} \exp \left[- \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\nu} \right) t \right] = \\ &= \frac{\nu}{\nu + \tau} \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\nu} \right) t \right) \right] \end{aligned}$$

Ostatecznie rozwiązanie układu równań Kołmogorowa (2) i (3) ma postać:

$$P_0(t) = \frac{\tau}{\tau + \nu} + \frac{\nu}{\tau + \nu} \exp \left[- \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\nu} \right) t \right] \quad (11)$$

$$P_1(t) = \frac{\nu}{\tau + \nu} \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\nu} \right) t \right) \right] \quad (12)$$

W równaniach tych przyjmujemy:

- τ - średni czas pomiędzy kolejnymi niebezpiecznymi wydarzeniami, które charakteryzują chwilową podatność górotworu do tąpnięcia,
- ν - średni czas, który charakteryzuje powrót górotworu do stanu równowagi, tj. stanu uznanego jako stan bezpieczny. Może to być np. stan, w którym wielkość energii sejsmicznej lub sejsmoakustycznej osiąga wartość określoną na drodze doświadczeń jako wielkość bezpieczną,
- t - czas obserwacji niebezpiecznych wydarzeń liczony od t_0 .

Wykres funkcji prawdopodobieństwa zajścia niebezpiecznego zdarzenia (silnego wstrząsu, tąpnięcia) jest przedstawiony na rys. 1. Na tym rysunku $\frac{\tau}{\nu + \tau}$ oznacza prawdopodobieństwo stacjonarne dla funkcji $P_0(t)$, a $\frac{\nu}{\tau + \nu}$ oznacza prawdopodobieństwo stacjonarne dla funkcji $P_1(t)$.

Wprowadzimy teraz wielkości liczbowe T_1 i T_2 , charakterystyczne dla przebiegu uaktywniania się zagrożenia. Wielkości te będą charakteryzowały czasową podatność górotworu do wystąpienia niebezpiecznego zdarzenia.

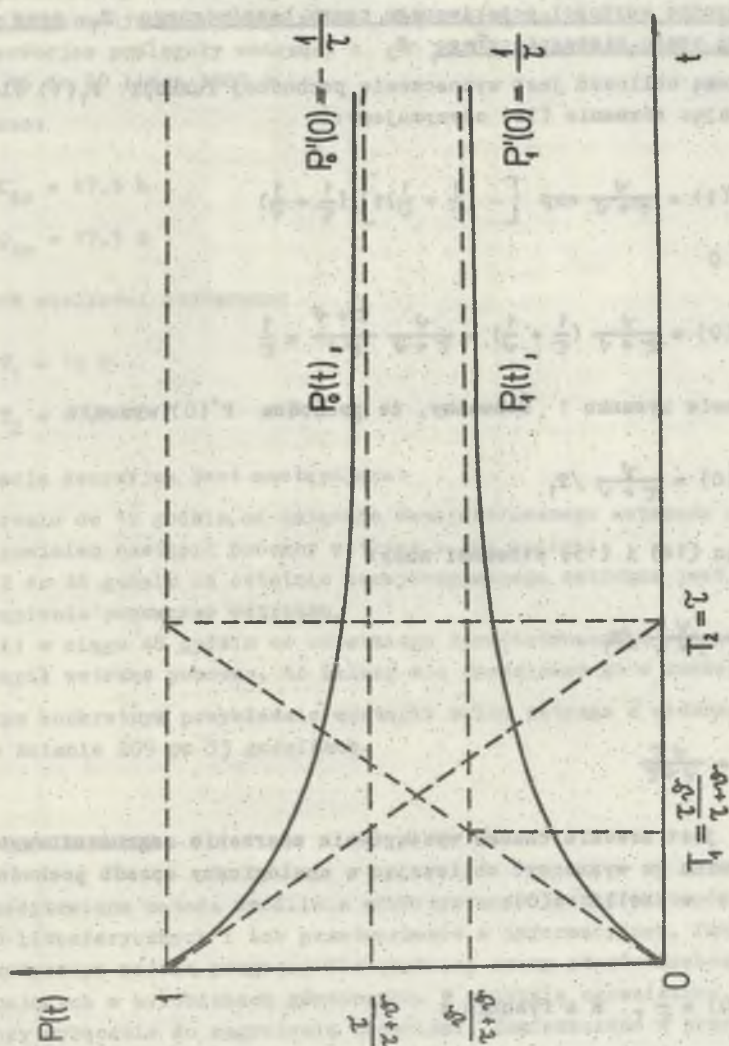


Рис. 1. Wykres funkcji prawdopodobieństwa zejścia zdarzeń sgrężeniowych (wstrząsów i tapan) wg wzorów (11) i (12)

Fig. 1. The plot of functions of probability of hazard occurrence tremors or rock bursts/according to formula (11) and (12)

Wartość stałej T_1 określa względny czas niewystąpienia zdarzenia zagrożeniowego. Nazwijmy ten czas oczekiwanym czasem bezpiecznym. Wartość T_2 jest czasem, w którym spodziewane jest wystąpienie zdarzenia zagrożeniowego. Czas pomiędzy T_1 i T_2 nazwijmy oczekiwanym czasem niebezpiecznym. Czas większy od T_2 nazwijmy czasem krytycznym.

Obliczenie wartości oczekiwanego czasu bezpiecznego T_1 , oraz oczekiwanego czasu niebezpiecznego T_2

Podstawą obliczeń jest wyznaczenie pochodnej funkcji $P_1(t)$ dla $t = 0$. Różniczkując równanie (12) otrzymujemy:

$$P_1'(t) = \frac{\nu}{\tau + \nu} \exp \left[- \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\nu} \right) t \right] \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\nu} \right) \quad (13)$$

dla $t = 0$

$$P_1'(0) = \frac{\nu}{\tau + \nu} \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\nu} \right) = \frac{\nu}{\tau + \nu} \frac{\tau + \nu}{\tau \nu} = \frac{1}{\tau} \quad (14)$$

Na podstawie rysunku 1 zauważmy, że pochodna $P_1'(0)$ wynosi:

$$P_1'(0) = \frac{\nu}{\tau + \nu} / T_1 \quad (15)$$

Porównując (14) i (15) stronami mamy:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{\nu}{\nu + \tau} / T_1 \quad (16)$$

Stąd

$$T_1 = \frac{\nu T}{\nu + \tau} \quad (17)$$

Czas T_2 jest średnim czasem wystąpienia zdarzenia zagrożeniowego. Graficznie można go wyznaczyć obliczając w analogiczny sposób pochodną funkcji $P_1(t)$ w chwili $t(0)$:

Ponieważ:

$$P_1'(0) = \frac{1}{\tau}, \quad \text{a z rysunku 1}$$

$$P(0) = \frac{1}{2}$$

Porównując stronami:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{T_2} \Rightarrow T_2 = \tau \quad (18)$$

Przykład obliczeniowy

Przykład dotyczy prognozy opartej na obserwacjach identyfikatorów aktywności mikrosejsmologicznej przeprowadzone w KWK "Pstrowski". Dotyczy sytuacji ruchowej ściany 209 w pokładzie 620. Dane oparto na przeprowadzonych obserwacjach, których wyniki zawarte są na rys. 2.

Obserwacjom podlegały wstrząsy o $E \geq 10^5$ J w okresie 96 godzin w dniach 16 do 20 lipca 1985 r.

Obliczono:

$$\tau_{\text{sr}} = 47,5 \text{ h}$$

$$\nu_{\text{sr}} = 17,1 \text{ h}$$

Dla tych wielkości otrzymano:

$$T_1 = 12 \text{ h}$$

$$T_2 = 47,5 \text{ h}$$

Informacja decyzyjna jest następująca:

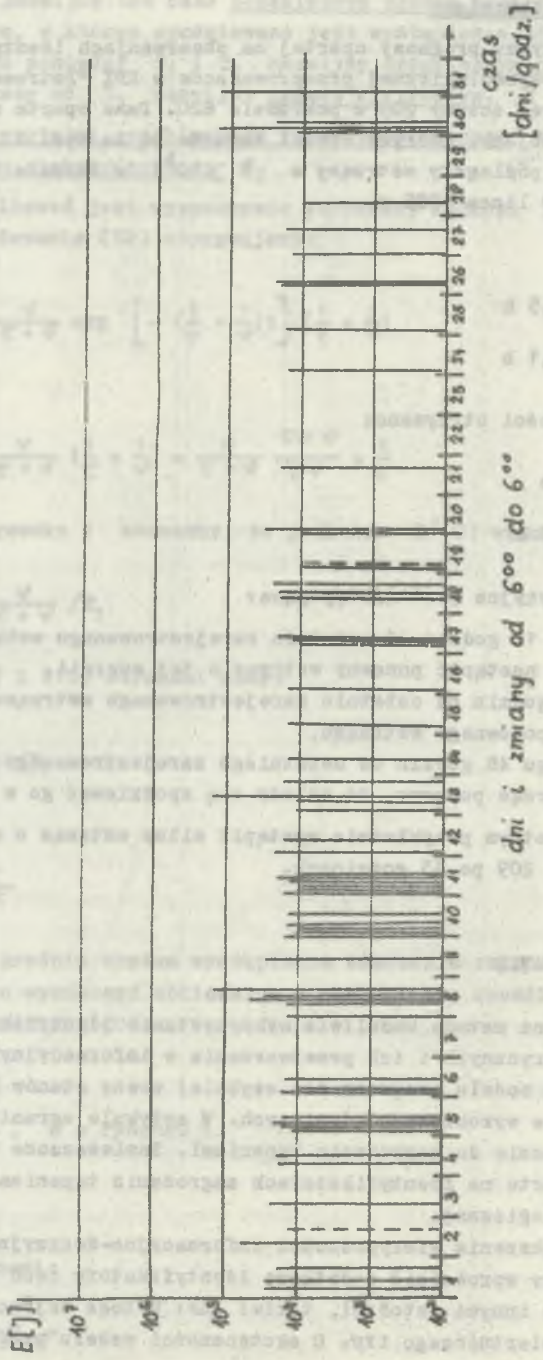
- w okresie do 12 godzin od ostatnio zarejestrowanego wstrząsu o $E \geq 10^5$ J nie powinien nastąpić ponowny wstrząs o tej energii,
- od 12 do 48 godzin od ostatnio zarejestrowanego wstrząsu jest możliwość wystąpienia ponownego wstrząsu,
- jeżeli w ciągu 48 godzin od ostatniego zarejestrowanego wstrząsu nie wystąpił wstrząs ponowny, to należy się spodziewać go w każdej chwili.

W tym konkretnym przykładzie wystąpił silny wstrząs o widocznych skutkach w ścianie 209 po 33 godzinach.

3. PODSUMOWANIE

Przedstawiona metoda umożliwia wykorzystanie identyfikatorów cech zagrożeń litosferycznych i ich przetworzenie w informacyjnym, funkcjonalno-stochastycznym modelu prognozy dla szybkiej oceny stanów niebezpiecznych występujących w wyrobiskach górniczych. W artykule ograniczono zakres prognozy wyłącznie do zagrożenia tąpnięciami. Zamieszczone w przykładzie obliczenia oparto na identyfikatorach zagrożenia tąpnięciami uzyskanych z metody sejsmologicznej.

W celu zwiększenia wiarygodności informacyjno-decyzyjnej o stanie zagrożenia należy wprowadzić dodatkowo identyfikatory cech zagrożenia tąpnięciami uzyskane innymi metodami, takimi jak: metoda sejsmoakustyczna, metoda sondażu wiertniczego itp. O skuteczności modelu prognozy zadecyduje



Rys. 2. Histogram aktywności mikrosejsmologicznej w ścianie 209, pokł. 620, KWK "Pstrowski", w lipcu 1985 r.
 Fig. 2. Histogram of microseismic activity in the face 209, bed 620, "Pstrowski" coal mine, in July 1985

porównanie uzyskanych wyników z wynikami obserwacji ruchowych przeprowadzonych w kopalniach. Aktualnie obserwacje takie są przeprowadzane w KWP "Pstrowski".

LITERATURA

1. Jaźwiński J., Ważyńska-Fiók K.: Niezawodność bezpieczeństwa systemów. Informator na kolokwium "Niezawodność bezpieczeństwa". Inst. Techn. Wojsk Lotniczych, Warszawa 1986.
2. Kidybiński A.: Podstawy geotechniki kopalnianej. "Śląsk", Katowice 1983.
3. Krzemień S.: Metoda systemowo-jakościowej oceny stanu zagrożeniowego zakładu górniczego. Z.N. Pol. Śl. Górnictwo, z. 139, Gliwice 1985.
4. Krzemień S. Zagrożenia litosferyczne w ujęciu teorii procesów losowych. ZN. Pol. Śl., Górnictwo z. 159, Gliwice 1987.
5. Opracowanie metody budowy stochastycznych modeli prognozowania stanów zagrożenia tapaniami w KWK w ujęciu systemowym. Praca zbiorowa pod kier. M. Kozdrója. Gliwice 1986. Cz. 1. maszynopis powielany.
6. Ryncarz T.: O systematycznej klasyfikacji zagrożeń występujących w górnictwie podziemnym. Kwartalnik AGH, Górnictwo, 1983, z. 3.
7. Szczurowski A.: Wprowadzenie do teorii powstawania wypadków. PWN, Katowice 1983.
8. Szklarski Z., Kozioł R.: Systemy sterowania procesem technologicznym w górnictwie. PWN, Warszawa-Kraków 1980.
9. Wanat J.: Wybrane zagadnienia BHP. Materiały szkoleniowe. SITG, Katowice 1968.
10. Zagrożenia naturalne w kopalniach. Praca zbiorowa pod red. B. Firganka i E. Klebanowa. "Śląsk", Katowice 1983.

Recenzent: Doc. dr hab. inż. Jan Stachowicz

Wpłynęło do Redakcji we wrześniu 1987 r.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОЦЕССА МАРКОВА В ПРОГНОЗИРОВАНИИ ОПАСНЫХ СОСТОЯНИЙ
В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ ПОДВЕРЖЕННЫХ ГОРНЫМ УДАРАМ

Резюме

В работе предложено использование точечного процесса Маркова для определения вероятности нахождения выработки /горного объекта/, подверженной горным ударам, в одном из возможных состояний.

Принято, что математической моделью подвергания горным ударам подземного объекта является процесс Маркова $\{X_t, t \geq 0\}$ состоящий из переменных $X_t = 0$, когда горный массив не подготовлен к горному удару, и $X_t = 1$, когда горный массив подготовлен к горному

удару. В качестве критериев подготовки горного массива к горному удару принимаются идентификаторы черт грозных явлений, называемые предвестниками опасных ситуаций, которые могут быть получены на основе микросейсмического метода, сейсмоакустического метода или других методов наблюдения.

Принято, что вероятность нахождения горного массива в состоянии $i = 0, 1$ является решением уравнений Колмогорова. Решение этих уравнений при определённых краевых условиях позволяет оценить вероятность нахождения анализированных объектов в состоянии склонном к горному удару.

Приводится пример прогнозирования состояния опасности на основе наблюдений над идентификаторами микросейсмической активности в шахте им. Пстровского.

UTILIZATION OF MARKOW PROCESSES FOR FORECASTING DANGEROUS STATES IN MINING EXCAVATION BEING IN DANGER OF ROCK BURST

S u m m a r y

The article deals with suggestion of utilization of MARKOW point process for pointing out the probability of excavation (mining object) being in one of possible states of danger of rock burst.

It has been assumed that the mathematical model of rock burst danger of any underground object is two state Markow process ($x_t, t > 0$) formed out of random variables $x_t = 0$ when the rock mass is not ready for rock burst and $x_t = 1$ when the rock mass is not ready for rock burst.

The criteria for preparing the rock mass to burst have been the identifiers of the features of hazard phenomena so called foreumiers or precursors of dangerous events which can be obtained on the basis of microseismic, seismoacoustic, drilling methods or other observational-experimental methods.

It has been assumed that probabilities of the rock mass in the condition $i = 0, 1$ are the solution of Kolmogorow equations, the of these equations at assigned boundary conditions allows to estimate the probability of occurrence of analysed objects in state close to rock burst or full tremor. The enclosed example deals with the prognosis of the hazard state on the basis of observation of identifiers of mikro seismic activity in "Pstrowski" coal mine.