

ELŻBIETA PILECKA

Elementy analizy ryzyka w rejonie eksploatacji zagrożonym sejsmicznie

Słowa kluczowe

Projektowanie eksploatacji, analiza ryzyka, prawdopodobieństwo niepowodzenia

Streszczenie

Jednym z elementów analizy ryzyka jest prawdopodobieństwo wystąpienia niepowodzenia. Przedstawiono sposób oceny prawdopodobieństwa niepowodzenia dla wyrobiska lub rejonu eksploatacji zagrożonego tąpnięciami. Przyjęto, że model określania prawdopodobieństwa zaistnienia niepowodzenia jest określony w oparciu o rozkład Poissona, który jest użyty do wyznaczania prawdopodobieństwa zniszczenia.

Przeprowadzono przykładowe obliczenia, w których prawdopodobieństwo wystąpienia niepowodzenia zostało opisane przez przekroczenie krytycznej wielkości przyspieszenia drgań cząsteczek górotworu. Przedstawiono zalety i ograniczenia analizy ryzyka oraz podkreślono, że mimo znaczącego rozwoju metod tej analizy jej zastosowanie w górnictwie jest niewielkie.

Wprowadzenie

Na potrzeby analizy techniczno-ekonomicznej przez ryzyko przedsięwzięć geotechnicznych należy rozumieć iloczyn prawdopodobieństwa niepowodzenia i kosztów skutków (Pilecka 2000).

W literaturze spotyka się kilka innych sposobów definiowania ryzyka, np. jako (Sleziak 1998):

- szansa dotkliwej konsekwencji,
- prawdopodobieństwo zagrożenia na jednostkę czasu i koszty szkody,
- prawdopodobieństwo straty lub rozmiar straty bądź inne wielkości statystyczne charakteryzujące stratę.

* Dr inż., Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków.

W warunkach rynkowych podjęcie decyzji o eksploatacji węgla w pokładach zagrożonych tąpnięciami powinna poprzedzać analiza ryzyka. Według stanu na dzień 31.12.1999 r., spośród 47 czynnych kopalń węgla kamiennego 32 (czyli 68%) prowadzą eksploatację pokładów zagrożonych tąpnięciami. Wydobycie węgla z takich pokładów stanowiło w 1999 roku około 35,7% ogólnego wydobycia. Wydobycie natomiast rudy miedzi w 1999 roku pochodziło w całości ze złóż zagrożonych tąpnięciami (Magiera, Mirek 2000).

W niniejszym artykule skoncentrowano się na sposobie określania prawdopodobieństwa zaistnienia niepowodzenia, które także bez uwzględnienia kosztów skutków może być miarą ryzyka. W rozważaniach adaptowano rozwiązania zaproponowane przez Whitmana i Cornella (Lomnitz, Rosenblueth 1976) oparte na procesie Poissona opisującym występowanie silniejszych wstrząsów.

Określenie prawdopodobieństwa wystąpienia niepowodzenia w przedstawionym ujęciu może być pomocne w podjęciu decyzji wyboru jednego z alternatywnych rozwiązań prowadzenia prac górniczych w aspekcie kosztów takiego rozwiązania i wynikających z niego konsekwencji w danym zagrożonym rejonie. Mając określone prawdopodobieństwo wystąpienia niepowodzenia, przykładowo 20%, można wyliczyć ryzyko mnożąc 20% przez koszty strat, które wynikają ze zniszczeń obiektu i wypadków.

1. Ryzyko prowadzenia prac górniczych w rejonach zagrożonych sejsmicznie

Ryzyko wykonania prac górniczych w rejonach zagrożonych sejsmicznie zależy od wielkości zjawiska sejsmicznego, jakie może zaistnieć oraz odpowiedzi obiektu na to zjawisko. Na potrzeby przedstawionych rozważań przyjęto, że przez obiekt należy rozumieć konkretne wyrobisko lub rejon eksploatacji, w którym prowadzone prace górnicze indukują wstrząsy górotworu.

W ogólnym ujęciu miarę ryzyka prowadzenia prac górniczych w rejonach sejsmicznych można zapisać w postaci całkowitego prawdopodobieństwa:

$$P(R_i) = \sum_{j=0}^{j=i} P(R_i/S_j) P(S_j) \quad (1.1)$$

gdzie:

- R_i — stan obiektu wynikający ze zniszczeń spowodowanych konkretnym zjawiskiem sejsmicznym,
- $P(R_i)$ — prawdopodobieństwo zaistnienia stanu R_i ,
- S_j — zagrożenie sejsmiczne na j -tym poziomie,
- $P(R_i/S_j)$ — prawdopodobieństwo zaistnienia stanu R_i spowodowanym zagrożeniem sejsmicznym na j -tym poziomie.

We wzorze (1.1) S_j oznacza wielkość zagrożenia sejsmicznego w danym rejonie i może być przedstawiona przez przyspieszenie drgań cząsteczek górotworu, prędkość drgań, aktywność sejsmiczną, energię lub magnitudę wstrząsu czy stopień skali intensywności zjawiska sejsmicznego.

smicznego, np. MSK. Jeżeli wielkość S_j może być wyrażona w postaci ciągłej, to zależność (1.1) można wyrazić w postaci:

$$P(R_i) = \int P(R_i/S_j = s) f_s(s) ds \quad (1.2)$$

gdzie:

$f_s(s)$ — funkcja gęstości prawdopodobieństwa S_j .

Jeżeli odpowiedź obiektu, a więc stan R jest również funkcją ciągłą, to dystrybuantę R można zapisać jako:

$$P(R \leq r) = F_R(r) = \int F_{R/S}(r; s) f_s(s) ds \quad (1.3)$$

gdzie:

$F_{R/S}(r; s)$ — dystrybuanta R wywołanego przez S_j i równego s .

W ogólności S_j opisuje zagrożenie sejsmiczne w danym rejonie, w którym zdarzenie R_i może być opisem stanu obiektu po zaistnieniu wstrząsu. Przykładowo R_i może być najbardziej niekorzystną reakcją budowli na wstrząs, oznaczającą zniszczenie obiektu w rozważanym przedziale czasu. Forma równania (1.1) wyraża połączenie dwóch źródeł niepewności, które akumulują w sobie wielkości oddziaływań sejsmicznych na obiekt i reakcji tego obiektu na dany poziom sejsmiczności. Wynika z tego potrzeba określenia prawdopodobieństwa zagrożenia sejsmicznego $P(S_j)$ dla każdego poziomu j oraz prawdopodobieństwa zajścia różnych reakcji zachowania się obiektu na określone poziomy zagrożenia sejsmicznego — $P(R_i/S_j)$.

2. Statystyczny model zdarzeń sejsmicznych

Od wielu lat stosuje się modele probabilistyczne do opisu sejsmiczności indukowanej działalnością górnictwem (Cianciara, Marczak 1991; Cianciara 1995; Lasocki 1995; Marczak 1995). Jednym ze stochastycznych modeli używanych do takiego opisu sejsmiczności jest rozkład Poissona. Model ten jest dużym uproszczeniem, gdyż w rzeczywistości rozkład energii wstrząsów jest opisany w formie rozkładu energetycznego (Gutenberg, Richter 1944; Zuberek 1991). Natomiast strumień zdarzeń, w którym uwzględnia się związek pomiędzy odstępami między zdarzeniami i ich energią nazywa się procesem Coxa (1955). W niniejszym artykule przyjęto założenie, że wstrząsy sejsmiczne mają energię równą lub większą od 10^5 J i są od siebie niezależne, a prawdopodobieństwo pojawienia się N wstrząsów w przedziale czasu $(0, t)$ jest równe:

$$P_N = (\lambda t)^N \exp(-\lambda t) / N! \quad (2.1)$$

gdzie:

λ — średnia częstość wystąpienia zdarzeń, jakie pojawiają się w jednostce czasu (tzw. aktywność w interwale czasu).

Proces Poissone'a używany do opisu zagrożenia sejsmicznego ma istotne ograniczenie wynikające z założenia o jednorodności strumienia zdarzeń. W rzeczywistości rozkład wstrząsów zależy od procesu fizycznego zachodzącego w górotworze, który ma wpływ na pojawienie się kolejnych wstrząsów — ich grupowania się w czasie lub w przestrzeni. Czas oczekiwania na kolejny wstrząs w grupie wstrząsów zmniejsza się w miarę upływu czasu rzeczywistego, a to nie jest zgodne z założeniami procesu Poissone'a (Esteve 1974). Jednakże w sytuacjach kiedy aktywność sejsmiczna jest niezmienna w czasie, proces Poissone'a może być użytecznym narzędziem do opisu rozkładu zdarzeń sejsmicznych. W szczególności ma to zastosowanie w rejonach o słabszej aktywności sejsmicznej, gdzie okres pojawiania się wstrząsów silniejszych jest stosunkowo długi lub w rejonach o silnej sejsmiczności, gdzie trudno mówić o procesie grupowania się wstrząsów w przestrzeni i w czasie.

3. Odpowiedź obiektu na oddziaływanie sejsmiczne

W analizie ryzyka w najprostszej postaci przyjmuje się, że obiekt może się znaleźć w jednym z dwóch stanów — niezniszczonym (stan 0) i zniszczonym (stan 1). W zależności od zastosowania, stan 1 może być zdefiniowany jako:

- zniszczenie do usunięcia, którego koszty naprawy mogą być większe niż P% wartości obiektu,
- zniszczenie obejmujące znaczące prawdopodobieństwo zaistnienia wypadku ciężkiego lub śmiertelnego.

Transformacja ze stanu 0 do stanu 1 zachodzi po przekroczeniu pewnego poziomu krytycznego. W rzeczywistości poziom ten jest związany ze sposobem odpowiedzi obiektu. Można zatem przyjąć, że zniszczenie jest funkcją odpowiedzi obiektu na zagrożenie sejsmiczne. W wielu zastosowaniach poziom krytyczny jest wyrażony bezpośrednio przez parametr opisujący intensywność drgań górotworu czy energię sejsmiczną. Oszacowanie odpowiedzi obiektu wyrażonej przez jego stan zniszczenia jest zadaniem inżynierskim.

Reprezentacja przez dwa stany jest dużym uproszczeniem, prowadzi jednak bezpośrednio do oceny miary ryzyka w sposób ogólnie zrozumiały, np. prawdopodobieństwo zaistnienia zniszczenia obiektu w określonym czasie dla określonego wariantu jest mniejsza niż 10%.

4. Przykład obliczenia prawdopodobieństwa niepowodzenia dla obiektu zagrożonego sejsmicznie

Dla zrealizowania postawionego zadania przyjmujemy następujące założenia:

- wartość energii wstrząsu, przy którym może nastąpić zniszczenie jest większe lub równe od 10^5 J,
- zniszczenie obiektu rozważa się pomijając odległość od ogniska wstrząsu. Przyjmijmy, że obiekt, który jest zagrożony sejsmicznie S_j zostanie zniszczony przy wystąpieniu przyspieszenia drgań cząsteczek górotworu na poziomie a . Prawdopodobieństwo tego zniszczenia jest

$P(R_i)$, natomiast prawdopodobieństwo p , że przyspieszenie drgań przekroczy a może być zapisane w postaci empirycznej, wykładniczej (Lomnitz i Rosenblueth 1976):

$$p = c a^{-k} \quad (4.1)$$

gdzie:

c, k — parametry empiryczne, wyznaczane na podstawie statystycznej analizy zagrożenia sejsmicznego danego rejonu.

Jeżeli średni poziom ilości wstrząsów mogących spowodować zagrożenie sejsmiczne (czyli wstrząsów, których energia jest większa lub równa 10^5 J) jest n na rok, wówczas średnia częstość wystąpienia takich zjawisk, gdzie przyspieszenia drgań górotworu jest większe lub równe a można zapisać jako λ_a :

$$\lambda_a = n p = \alpha a^{-k} \quad (4.2)$$

gdzie:

$$\alpha = n c$$

Niech stan R_i wyraża zniszczenie, które może zaistnieć i razy w rozważanym okresie T . Obiekt będzie w stanie R_i wtedy i tylko wtedy, gdy w okresie T wystąpi i razy przyspieszenie drgań większe niż a — przy założeniu, że zagrożenie sejsmiczne jest w stanie S_i .

Z rozkładu Poissona otrzymujemy:

$$P(R_i) = P(S_i) = \exp(-\lambda_a T) (\lambda_a T)^i / i! \quad (4.3)$$

W szczególności, prawdopodobieństwo nieuszkodzenia obiektu możemy przedstawić jako:

$$P(R_0) = \exp(-\lambda_a T) = \exp(-\alpha T a^{-k}) \quad (4.4)$$

Natomiast prawdopodobieństwo tego, że obiekt zostanie zniszczony przynajmniej jeden raz można zapisać jako: $P = 1 - P(R_0)$. Przy wielokrotnym zniszczeniu obiektu zakłada się, że po każdym zniszczeniu obiekt ten był naprawiany, tak że poziom krytyczny stale był równy a .

Dla zilustrowania użycia powyższych zależności przyjmujemy, że w okresie 6 miesięcy zagrożenie sejsmiczne wyrażone jest przez krytyczną wartość przyspieszenia drgań górotworu i przybiera wartość $0,6$ m/s². Możemy obliczyć jakie jest prawdopodobieństwo, że obiekt znajdujący się w tym rejonie sejsmiczności ulegnie uszkodzeniu. Dla obliczeń musimy przyjąć następujące wartości: liczbę silniejszych wstrząsów (równych lub większych od 10^5 J) w danym rejonie, np. $n = 100$ w okresie półrocznym (0,5 roku) oraz parametry empiryczne dla danego rejonu wyznaczane z analizy statystycznej zagrożenia sejsmicznego danego rejonu $k = -2$ i $c = 0,001$.

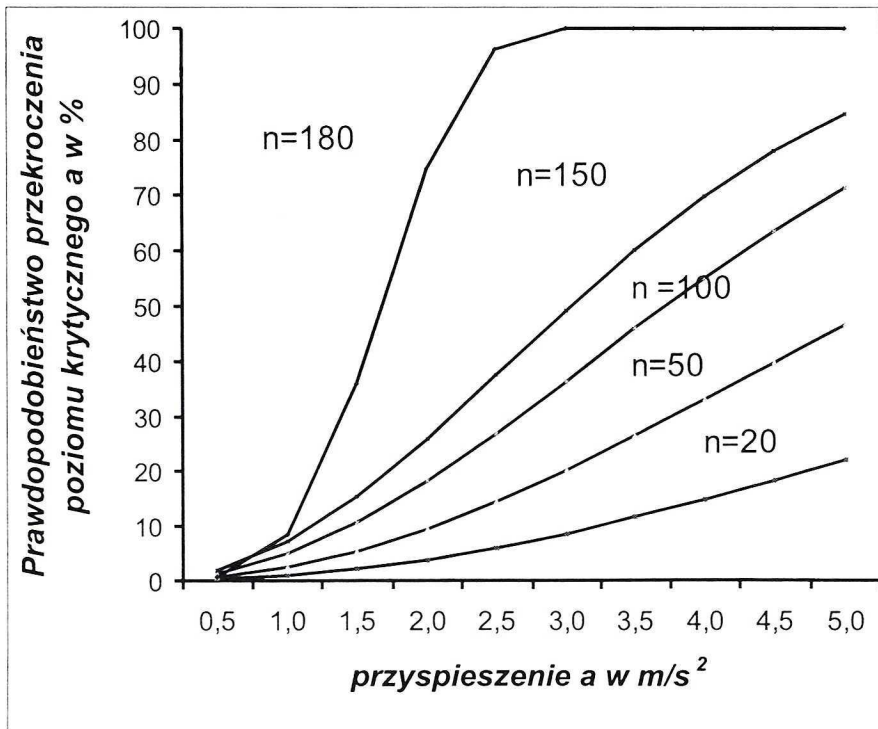
Korzystając z (4.4) otrzymujemy:

$$P(R_0) = 0,9 = \exp(-\lambda_a T) = \exp(-\alpha T a^{-k}) \quad (4.5)$$

stąd

$$P(R_0) = 0,982, \quad \text{czyli} \quad P = 1 - P(R_0) = 0,018 \quad (4.6)$$

Czyli ryzyko, że obiekt w okresie półrocznym ulegnie uszkodzeniu przy przekroczeniu krytycznego poziomu przyspieszenia drgań górotworu $a = 0,6 \text{ m/s}^2$ wynosi około 2%. Ilustrację ryzyka uszkodzenia obiektu w znaczeniu prawdopodobieństwa przekroczenia poziomu krytycznego dla zagrożenia sejsmicznego wyrażonego przez wielkość przyspieszenia górotworu dla różnej liczby silniejszych wstrząsów w danym rejonie przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Zależność prawdopodobieństwa przekroczenia poziomu krytycznego od przyspieszenia drgań cząsteczek górotworu dla różnej liczby wstrząsów w okresie 6 miesięcy

Fig. 1. Graphs of probability of exceeding critical level vs. peak ground acceleration for different number of tremors in 6 months period

Podsumowanie

Prowadzenie prac górniczych w rejonach zagrożonych sejsmicznie wymaga podjęcia ryzyka, które powinno być optymalizowane na etapie podejmowania decyzji. Analiza ryzyka przedstawiona w niniejszej publikacji wymaga zebrania odpowiednich informacji o charakterze zagrożenia sejsmicznego w warunkach podobnych do analizowanych oraz informacji o konsekwencjach technologicznych wynikających z zaistnienia krytycznego poziomu zagrożenia sejsmicznego. Dane te są wykorzystywane do szacowania ryzyka różnych wariantów prowadzenia prac górniczych i tym samym podjęcia decyzji najbardziej korzystnej.

Przedstawiony w artykule sposób jest jednym z możliwych tego typu rozwiązań. Z uwagi na nieskomplikowany zapis może on znaleźć szersze zastosowanie w praktyce przy przyjętych założeniach o zagrożeniu sejsmicznym. Pomimo znaczącego rozwoju metod analizy ryzyka ich zastosowanie w projektowaniu prac górniczych jest niewielkie. Wydaje się, że podstawowym ograniczeniem jest pracochłonność zbierania i opracowywania danych wejściowych.

LITERATURA

- Cianciara B., Marczak H., 1991 — Ocena zagrożenia tąpnięciami w oparciu o rozkłady statystyczne parametrów opisujących sygnały sejsmiczne zarejestrowane w kopalniach, Mat. III Krajowej Konf. Naukowo-Technicznej: Zastosowanie metod geofizycznych w górnictwie kopalni stałych t. I, 129—146, Kraków.
- Cianciara B., 1995 — Stochastyczny opis emisji sejsmoakustycznej. Poradnik Geofizyka Górniczego, t. 2, Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej, 248—260, Kraków.
- Cox D.R., 1955 — Some statistical methods related with series of event. J. Roy. Soc. B, 17,2.
- Esteve L., 1974 — Geology and probability in the assessment of seismic risk. Proc., 2nd Int. Congr. Int. Assoc. Eng. Geol., Sao Paulo.
- Gutenberg B., Richter C.F., 1944 — Frequency of earthquakes in California. Bull. Seismol. Soc. Am., 34, 185—188.
- Lomnitz C., Rosenbluth E., 1976 — Seismic Risk and Engineering Decisions, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- Lasocki S., 1995 — Statystyczne rozkłady zjawisk sejsmologicznych. Poradnik Geofizyka Górniczego, t. 2, Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej, 174—190, Kraków.
- Magiera W., Mirck A., 2000 — Zagrożenie tąpnięciami w górnictwie polskim w 1999 roku, Mat. Symp.: Warsztaty 2000, 167—181, Kraków.
- Marczak H., 1995 — Wpływ struktury górotworu naruszonego robotami górniczymi na tworzenie sekwencji wstrząsów górniczych, Wstrząsy Górnicze — Mechanizm, lokalizacja i energia. Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej, seria Wykłady nr 8, 49—68, Kraków.
- Pilecka E., 2000 — Analiza ryzyka w przedsięwzięciach geotechnicznych — podstawowe zasady, Mat. Symp.: Warsztaty 2000, 191—195, Kraków.
- Słeziak G., 1998 — Zastosowanie analizy ryzyka w ocenie warunków pracy w górnictwie australijskim. Mat. Szkoły Eksploatacji Podziemnej '98, IGSMiE PAN, 591—605.
- Zuberck W.M., 1992 — Rozkład energetyczny emisji sejsmoakustycznej — interpretacja fizyczna i statystyczna. [W:] Zastosowanie metod geofizycznych w górnictwie kopalni stałych. Jaworzno 28—30 listopad 1992, Wyd. AGH, Kraków.

ELEMENTS OF RISK ANALYSIS OF THE MINING REGION UNDER SEISMIC THREAT**Key words**

Mining planning, seismic threat, risk analysis

Abstract

Design of mining under seismic threats implies choice from among alternatives. For each alternative solution the designer should assess the associated risk. It requires synthesis of many kinds of information. The decision process demands a weighing of the costs, risks and benefits of the alternatives, and ultimately the choice of the single.

This risk is a composite of both the likelihood of various levels of seismic threat and the uncertainty in the response of the object behaviour. Other words, the total risk is the combined effect of the different possible seismic events that might occur and the different ways in which a particular object may respond to a given event.

In this paper the object is exposed to a probabilistically defined seismicity. It is assumed that the event occurrence constitutes a Poisson process. It means that the energy events are independent and identically distributed. This assumption implies that the distribution of the renewal time of event occurrence is not modified by physical process involved. In some instances, however, seismic activity tends to be more periodic and a renewal model can represent Poisson's process. It is possible for events having very long returned periods — rather weak seismicity — or when high seismicity produces difficulties in recognising of events clustering in space and time.

The response of object is related with mining performance. It can be predicted considering uncertainties represented in purely technical terms, which can be combined with economic consequences and hence expressed in economic terms.

The decision making under uncertainty is the tool not used frequently in mining planning. The basic reason for this seems to prevail that the procedure requires an excessive effort in data collection and preparation.