

*Jerzy Kornowski**

PROSTA, FORMALNA METODA ŁĄCZNEJ OCENY ZAGROŻENIA TĄPNIĘCIEM, NA PODSTAWIE INFORMACJI GEOFIZYCZNEJ I METODY ROZEZNANIA GÓRNICZEGO

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki kontynuowanych badań (Kornowski 2009) nad formalizacją Metody Rozeznania Górniczego (MRG) i połączeniem jej z (geofizyczną) prognozą sejsmicznego zagrożenia tąpnięciem, prowadzących do opracowania metody (oceny i prognozy zagrożenia tąpnięciem) obejmującej niemal całość (bez wierceń małośrednicowych) dostępnych informacji o tym zagrożeniu. Dzięki pełnej formalizacji – polegającej na przedstawieniu, uzyskanych za pomocą MRG, informacji w formie brzegowych rozkładów prawdopodobieństwa tąpnięcia w konkretnych (lokalnych) warunkach – było możliwe wyeliminowanie większości „niedoskonałości” wyników badań uzyskanych w 2009 roku i przedstawienie metody niezwykle prostej, łatwej do zastosowania w kopalniach wyposażonych w sieci sejsmologii i sejsmoakustyki, i – jak się wydaje – zgodnej z intencjami autorów MRG. Do jej opracowania – na etapie wyprowadzania i uzasadniania metody – było konieczne zastosowanie pojęć z zakresu rachunku prawdopodobieństwa wielu zmiennych.

Simple, formal method of rockburst hazard evaluation with geophysical, geological and mining information

Abstract

This paper is a continuation of research reported in (Kornowski 2009), on formalization of the so-called mining method of hazard evaluation (abbreviated MRG) and connecting it with the geophysical prediction of (time series of) total seismic emission energy from the time and space interval $[(t, t + \Delta t), S]$. Due to the fully formal but simple statement of hazard estimator/predictor (where geological and mining characteristics are represented as marginal distributions of hazard multivariate probability), problems previously encountered have been eliminated and the simple method of prediction can be presented.

1. WPROWADZENIE

1.1. Cel i przedmiot badań

Celem badań było wykazanie możliwości prostej formalizacji – czyli przedstawienie w ścisłej, dobrze zdefiniowanej formie matematycznej – zagadnienia prognozy zagrożenia tąpnięciem, obejmującej informacje dotąd osobno uzyskiwane za pomocą Metody Rozeznania Górniczego (dalej MRG) oraz metod sejsmologii górniczej i sejsmoakustyki.

Powiązanie informacji i metod oceny/prognozy zagrożenia osiągnięto dzięki przedstawieniu informacji uzyskanych za pomocą MRG w formie rozkładów brzegowych (możliwych do ilościowej aproksymacji, z zastosowaniem „punktów”, które

* Główny Instytut Górnictwa

zgodnie z MRG, są przypisywane różnym warunkom geologicznym i górnictwem) multiplikatywnie modyfikujących zagrożenie prognozowane metodami sejsmologii górniczej i sejsmoakustyki. Prognoza zagrożenia sejsmicznego i zagadnienie połączenia metod sejsmologii i sejsmoakustyki były przez autora niniejszego artykułu wielokrotnie opisywane (np. Kornowski, Kurzeja 2008) i stosowane w praktyce. Próba unifikacji z MRG po raz pierwszy została omówiona w publikacji (Kornowski 2009), a niniejszy artykuł stanowi jej kontynuację. Podstawowe znaczenie w tych badaniach miało założenie, że Instrukcja MRG powinna być traktowana „na serio i dosłownie”. Inne możliwości, a także analiza jakości otrzymywanych w praktyce ocen i prognoz będą przedmiotem przyszłych badań.

1.2. Metoda Rozeznania Górniczego – oznaczenia i terminologia

Metoda została dokładnie opisana w znanej Instrukcji MRG z 2007 roku – dalej skrótowo oznaczanej IMRG – dlatego opisu w niniejszym artykule nie powtórzono.

W metodzie uwzględnia się 19 czynników (kształtujących zagrożenie tąpnięciami, dalej CKZ) wyszczególnionych w tabelicy 1 IMGR. Czynniki te oznaczono jednoindeksowym symbolem C_i , gdzie indeks i odpowiada liczbie porządkowej czynnika w tabelicy 1 IMRG. By nie rozbudowywać tego artykułu autor ograniczył się do dwóch czynników: C_1 (głębokości prowadzenia robót) i C_3 („skłonności” do tępnięć określonej przez R_c). Zgodnie z tabelicą 1 IMRG, obszar zmienności (dziedzina) każdego i -tego czynnika C_i , dzieli się na kilka klas/poziomów – określenia te są traktowane dalej jako synonimy i używane zamiennie – o granicach określonych opisowo lub liczbowo. Klasy/poziomy są oznaczane dwuindeksowym symbolem C_{il} , gdzie drugi indeks l wskazuje klasę lub liczbową wartość czynnika. Każdej klasie każdego czynnika, czyli każdemu symbolowi C_{il} , jest przypisana pewna wartość liczbowa („punkty”) Q_{il} , określająca „siłę wpływu” czynnika C_i w klasie l – na stan zagrożenia tąpnięciami. Tak więc C_{13} , to czynnik „głębokość robót” na poziomie „> 700 m” i $Q_{13} = 3$.

Choć wartości punktowe Q_{il} mają wyłącznie „eksperyckie” uzasadnienie (zgodnie z p. 8 IMRG, czytamy: „przedstawione w tabelicy 1 wartości punktowe (...) należy traktować jako przykładowe”) przyjęto je bez dyskusji. Znacznie ważniejsza – bo podstawowa w tej publikacji – jest fizyczna interpretacja „punktów” Q zaproponowana w rozdziale 3.

Interesujący fragment tabelicy 1 IMRG ma więc, z uwagi na powyższe nazwy i symbole, następującą postać:

Tablica 1. Początkowy fragment tabelicy 1 IMRG

i	Czynnik C_i	Poziom/klasa C_{il} czynnika	Punkty Q_{il}
1.	Głębokość robót	< 400 m	0
		400–700 m	1
		> 700 m	3
2.	Występowanie tępnięć po 1980 roku w danej kopalni	nie	-2
		tak, w danym pokładzie	0
		tak, w danym pokładzie i w danej parceli	3
3.	R_c	$R_c \leq 16$ MPa	0
		$R_c > 16$ MPa	2

przy czym należy pamiętać, że klasa/poziom czynnika może przyjmować wartości (przedziałowe) liczbowe lub opisowe.

2. DEFINICJA ZAGROŻENIA TĄPNIECIEM

Definicja zagrożenia tąpnięciem Z^T lub dokładniej $Z^T[(t, t + \Delta t), S]$, określająca przedział czasu $(t, t + \Delta t)$ i obszar (S) , dla którego ocenia się zagrożenie, została podana w rozdziale 1.2 książki (Kornowski, Kurzeja 2008). Należy więc tylko przypomnieć, że „**zagrożenie**” wiąże się z **ryzykiem**, którego powszechnie przyjęta definicja ma postać:

$$\text{ryzyko} = \left\{ \begin{array}{c} \text{prawdopodobieństwo} \\ \text{wystąpienia} \\ \text{szkodliwego zdarzenia} \end{array} \right\} \cdot \left\{ \begin{array}{c} \text{straty} \\ \text{spowodowane} \\ \text{tym zdarzeniem} \end{array} \right\}$$

Nie chcąc wikłać się w odległe od zagadnień geofizyki górniczej problemy dotyczące wyceny strat, w szczególności życia i zdrowia ludzi, zagadnienie to można pominąć, ograniczając się do prognozy **prawdopodobieństwa** (wystąpienia szkodliwego zdarzenia) i stosując inną – lecz zbliżoną i znaną – nazwę, mianowicie **zagrożenie**:

Zagrożenie tąpnięciem Z^T lub $Z^T[(t, t + \Delta t), S]$ – z podkreśleniem liczby pojedynczej (tąpnięciem, bo zagrożenie tąpnięciami to jest coś innego) – dotyczy traktowanego jako całość obszaru S (np. ściany wraz z „bezpośrednim otoczeniem”) i okresu $(t, t + \Delta t)$. $Z^T[(t, t + \Delta t), S]$ jest to **prawdopodobieństwo wystąpienia tąpnięcia (T) w $[(t, t + \Delta t), S]$. Jako prawdopodobieństwo, Z^T spełnia nierówności $0 \leq Z^T[(t, t + \Delta t), S] \leq 1$. Przedział osi liczbowej $(0, 1)$ zawsze można podzielić na odcinki (np. $0-10^{-5}-10^{-3}-1$) i nazwać je stanami zagrożenia tąpnięciem oraz oznaczyć symbolami a, b, c , nawiązując do pojęć znanych użytkownikom.**

Podział odcinka $(0-1)$ na różne stany zagrożenia wpływa zarówno na bezpieczeństwo, jak i na ekonomikę produkcji, nie należy więc do zakresu geofizyki. Należy jednak mocno podkreślić, że właśnie ten podział nadaje jednoznaczny fizyczny i ilościowy sens pojęciu „stan zagrożenia” i jest nadzwyczaj ważny, bo uwalnia użytkownika od potrzeby rozważania o prawdopodobieństwach. Wartości $Z^T[(t, t + \Delta t), S]$ są w praktyce dość łatwo obliczalne – lecz niepewność (tzn. wariancja) wyniku jest duża, zatem użyteczność jest ograniczona (a wynika to z niewielkiej – skądinąd „na szczęście” – liczby tępnięć).

Sugestia takiego, a nie innego podziału „przestrzeni zagrożeń” (czyli odcinka $0-1$) na stany, jest „ukłonem” w stronę **ryzyka**: przecież można by przyjąć, że to punkt $P = 1/2$ oddziela wyrobiska „gdzie należy oczekiwać tąpnięć” od innych. To właśnie potencjalnie ogromne „straty spowodowane tym zdarzeniem” skłaniają do przesunięcia „granic” stanów w stronę małych prawdopodobieństw, chroniąc użytkownika przed nawet mało prawdopodobnym, lecz katastrofalnym zdarzeniem.

Bez wdawania się w szczegóły, dotyczące mechaniki skał i procesów ich niszczenia, przyjęto, że w przybliżeniu, o prawdopodobieństwie tąpnięcia decydują:

a. Energia wstrząsu*. Gdy $E > E_g$ (gdzie E_g to „elementarna energia tąpnięcia” (Konopko 1994; Dubiński, Konopko 2000), to warunkowe prawdopodobieństwo $P(T|E)$ tąpnięcia wskutek E zwiększa się ze wzrostem energii (E) w sposób, który można aproksymować funkcją logistyczną: $P(T|E) = \{1 + \exp[-a(\log E - b)]\}^{-1}$; energię E można w przybliżony sposób prognozować – o czym dalej.

b. Pakiet czynników geologicznych i górniczych, wymienionych w IMRG (Barański i in. 2007), które, zgodnie z IMRG, kształtują zagrożenie tąpnięciem. Są to czynniki lokalne (cały pakiet czynników: $C_1 \dots C_{19}$ zbiorczo został nazwany „warunkami lokalnymi”), których wartości (dla danego wyrobiska/obszaru S) zmieniają się tylko sporadycznie, mogą więc być traktowane jako stałe i znane.

Tak więc, aby prognozować ilościowo zagrożenie, które z definicji jest prawdopodobieństwem tąpnięcia w $[(t, t + \Delta t), S]$, należy:

- prognozować (co Δt , np. co godzinę) rozkład prawdopodobieństwa energii E^C (o czym poniżej),
- oszacować warunkowe prawdopodobieństwo tąpnięcia wskutek E^C ,
- oszacować brzegowe prawdopodobieństwa tąpnięcia w danych warunkach lokalnych na podstawie informacji uzyskanych z IMRG – (3.8b) w rozdziale 3.

Zagadnienie prognozy energii sejsmicznej $E^C[(t, t + \Delta t), S]$ – która decyduje o zagrożeniu – było przedmiotem licznych publikacji autora i współpracowników (np. Kornowski, Kurzeja 2008; Kornowski 2003; Kurzeja 2005), nie zostało więc w tym artykule omówione. Jednak należy przypomnieć, że prognoza energii:

- dotyczy logarytmu energii całkowitej ($E^C = E^W + E^{AE}$), która jest sumą energii wstrząsów (E^W) i energii AE (E^{AE}), emitowanej z obszaru S obserwowanego przez sieć sejsmologiczną i sejsmoakustyczną,
- prognoza E^C ma charakter sekwencyjny, tzn. z końcem każdej godziny t jest formułowana prognoza na okres $(t, t + \Delta t)$, gdzie $\Delta t = 1$ godz; takie postępowanie umożliwia tworzenie szeregu czasowego energii, jego prognozę oraz ocenę błędu prognozy („po realizacji”); równocześnie postępowanie takie wymaga, aby z końcem każdej godziny t była oszacowana energia wstrząsów i AE w właśnie kończącej się godzinie: opóźnienie oszacowania odbiera sens prognozie!

* Według Kornowskiego i Kurzeji (2008, rozdz. 3.3.2), sam tylko ciąg wartości energii wstrząsów (lub „czysta metoda sejsmologiczna”) wyklucza nietrywialną prognozę, lecz szereg czasowy wartości E^C (energii całkowitej: $E^C = E^W + E^{AE}$) umożliwia (w teorii: tym lepiej im mniejsza wartość Δt i dokładniejsza obserwacja minionych E^C) prognozę E^C . Należy zauważyć, że prognozowana wartość E^C to najbardziej prawdopodobna górna granica energii wstrząsu w $[(t, t + \Delta t), S]$. Zatem ściślej jest stwierdzenie, że jest prognozowana górna granica E^C w $[(t, t + \Delta t), S]$ – na przykład, gdy wystąpi jeden i tylko jeden wstrząs i brak będzie AE. Prognozowanie, w ilu i jakich wstrząsach, mikrowstrząsach i impulsach AE ta energia (E^C) zostanie wyemitowana, jest zadaniem beznadziejnym i nie będzie dyskutowane. Nie ulega też wątpliwości, że o zagrożeniu w punkcie (x, y, z) decyduje raczej strumień energii e^* (x, y, z) , a nie E , energia w źródle, lecz odległość wyrobiska od źródła jest zazwyczaj niewielka, a stosowanie energii E (a nie e^*) bardzo upraszcza problem.

- prognoza ma charakter probabilistyczny, tzn. przyjmuje się, że $\log E^C$ jest (przed realizacją) zmienną losową o rozkładzie normalnym $N(\bar{E}, \sigma_{\log E}^2)$ * i prognozuje się (na najbliższą godzinę) wartość \bar{E} oraz $\sigma_{\log E}^2$. Te dwie wartości w pełni opisują zmienną $\log E$, umożliwiając obliczanie prawdopodobieństw przedziałowych i kwantyli (np. kwantyl G_{95} to energia, która z prawdopodobieństwem 95% nie będzie przewyższona w najbliższej godzinie).

Energia $E^C [(t, t + \Delta t), S]$ jest prognozowana na podstawie uprzednio zaobserwowanych jej wartości znanymi metodami (Kornowski, Kurzeja 2008; Box, Jenkins 1970) teorii szeregów czasowych. Oprogramowanie realizujące prognozę istnieje, działa i zostało między innymi opisane w (Kornowski, Kurzeja 2008).

Po sporządzeniu prognozy parametrów rozkładu energii, na podstawie statystycznych zestawień wstrząsów i tąpnięć (np. w GZW, w minionym dziesięcioleciu), można określić zagrożenie tąpnięciem wskutek wstrząsu o energii E , $P(T|E)$, w następujący sposób:

W podręcznikach rachunku prawdopodobieństwa (np. Feller 1966; Fisz 1969; Benjamin, Cornell 1977) można znaleźć, tak zwane twierdzenie o prawdopodobieństwie całkowitym, które można zapisać – stosując wygodne oznaczenia – w następującej postaci

$$P(T) = \sum_j P(\varepsilon_j) P(T | \varepsilon_j) \quad (2.1)$$

gdzie: ε_j to przedział energii: $\varepsilon_j = 10^j - 10^{j+1}$ J, $P(T)$ w równaniach (2.1) i (2.2), to (tak zwane „dynamiczne”, gdyż szybkozmiennie) prawdopodobieństwo tąpnięcia (czyli zagrożenie tąpnięciem: $P_{dyn}(T) \equiv Z_{dyn}^T$, określone z pominięciem wpływu CKZ), $P(\varepsilon_j)$ to prawdopodobieństwo, że prognozowana energia znajdzie w przedziale ε_j i $P(T|\varepsilon_j)$ to warunkowe prawdopodobieństwo tąpnięcia wskutek zdarzenia o energii ε_j (np. Kornowski, Kurzeja 2008, s. 142).

Można przyjąć, że indeks j zmienia się od 0 do $+\infty$ (dla E) lub od $-\infty$ do $+\infty$ (dla $\log E$).

Łatwo też można zauważyć, że przejście graniczne ($\varepsilon_j \rightarrow 0$) przekształca równanie (2.1) do postaci np. (Fisz 1969)

$$P(T) = \int_0^{\infty} p(E) P(T | E) dE \quad (2.2)$$

gdzie litera p oznacza gęstość prawdopodobieństwa, a P – prawdopodobieństwo. Nie jest istotne, czy całkę tę liczy się od 0 czy od E_g , jeśli E_g jest to tzw. elementarna energia tąpnięcia (Konopko 1994).

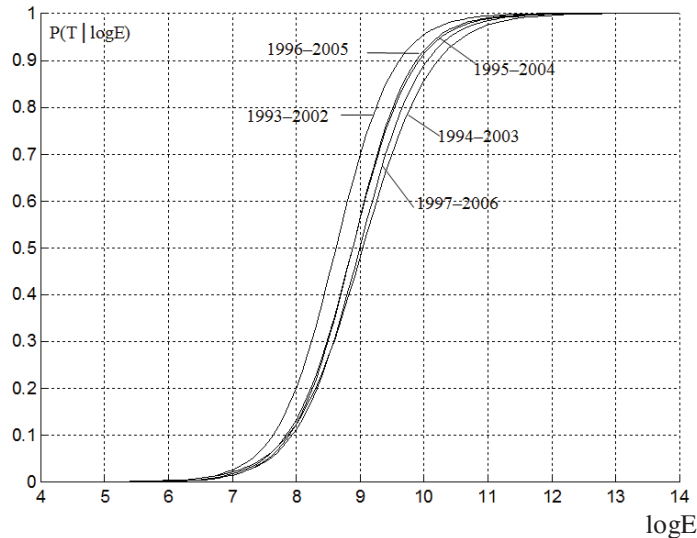
Po prognozie parametrów rozkładu $p(E)$ należy określić $P(T|E)$, warunkowe prawdopodobieństwo tąpnięcia (T), pod warunkiem wystąpienia energii E , oraz obli-

* Zatem energia E^C ma rozkład logarytmiczno-normalny; jest to użyteczna aproksymacja (nieznanego) rozkładu rzeczywistego.

czyć (numerycznie) całkę (2.2) definiującą Z^T . W zagadnieniach tego typu (np. Hosmer, Lemeshow 1989) powszechnie przyjmuje się, tzw. logistyczny model prawdopodobieństwa

$$P(T | E) = \{1 + \exp[-a(E' - b)]\}^{-1} \quad (2.3)$$

gdzie $E' = \log E$, natomiast a , b to parametry, których wartości liczbowe trzeba wyznaczyć na podstawie obserwacji. Łatwo można sprawdzić, że dla $E' \rightarrow 0$ $P(T|E) \rightarrow 0$ i dla $E' \rightarrow \infty$ $P(T|E) \rightarrow 1$, funkcja ta jest więc dobrym modelem dystrybuanty prawdopodobieństwa (rys. 1).



Rys. 1. Warunkowe prawdopodobieństwo tąpnięcia $P(T|E)$, pod warunkiem wystąpienia wstrząsu o energii E , aproksymowane na podstawie wyników obserwacji uzyskanych ze wszystkich zagrożonych tapaniami polskich kopalń węgla kamiennego w kolejnych dziesięcioleciach i na podstawie założenia, że w każdym przedziale $\varepsilon_j = (1 \cdot 10^j - 1 \cdot 10^{j+1})$ [J] energia jest skupiona w środku tego przedziału

Fig. 1. Conditional rockburst probability $P(T|E)$, under the condition of tremor occurrence with energy E , approximated on the basis of observation results obtained from all Polish hard coal mines endangered by rockbursts in subsequent decades and on the basis of the assumption that in every interval $\varepsilon_j = (1 \cdot 10^j - 1 \cdot 10^{j+1})$ [J] energy is concentrated in the middle of this interval

Ścisłe związane z tym zagadnieniem dane podali między innymi: Patyńska (2001–2006) i Barański (2003), a przedstawić je można w postaci tablicy (tabl. 2), stanowiącej podsumowanie danych o tapaniach i „silnych” wstrząsach z całego GZW z lat 1997–2006 (ilorazy N/N^T są to **prawdopodobieństwa empiryczne**).

Tablica 2. Uproszczona statystyka wstrząsów i tapan w polskim górnictwie węgla kamiennego w latach 1997–2006

Wyszczególnienie	Przedział energii t			
	$1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-9}$
Liczba wstrząsów N	9255	1555	155	6
Liczba wstrząsów N^T	9	14	11	2
N/N^T	0,000972	0,009003	0,069620	0,333333

Objaśnienie: Iloraz N/N^T to empiryczne prawdopodobieństwo tąpnięcia wskutek wstrząsu o energii w danym przedziale ε_j .

Obliczając wartości a , b (Kornowski, Kurzeja 2008, s. 143–144) otrzymuje się $a \approx 2,1$ i $b \approx 9$, zatem równanie (2.3) ma postać

$$P(T|E) = \frac{1}{1 + \exp[-2,1(E'-9)]} \quad (2.4)$$

Postać funkcji $P(T|E)$ przedstawiono na rysunku 1 dla pięciu (częściowo nakładających się) dziesięcioleci. Zarówno krzywe z rysunku 1, jak i równanie (2.4) umożliwiają określenie (warunkowego) prawdopodobieństwa tąpnięcia (T) wskutek zdarzenia o energii E , dla danej wartości $E' = \log E$ (wielkość E' nazywa się „energiją logarytmiczną”), z pominięciem jednak wpływu warunków górniczych i geologicznych.

Z uwagi na to, że liczne przykłady (np. Kornowski, Kurzeja 2008; Kurzeja 2005) wykazują, że rozkład logarytmu energii (rozkład „logarytmicznej energii” E') może być (z umiarkowaną dokładnością) aproksymowany rozkładem normalnym (zatem E – rozkładem logarytmiczno-normalnym)

$$p(E') = \{\sigma_E \sqrt{2\pi}\}^{-1} \exp\{-(E' - \bar{E})^2 / (2\sigma_E^2)\} \quad (2.5)$$

(gdzie wartości $\bar{E} = \bar{E}(t+1)$ i $\sigma_E = \sigma_E(t+1)$ zostały wyprognozowane), to równania (2.4) i (2.5) można wstawić do równania (2.2), otrzymując (przy pominiętym wpływie czynników geologicznych i górniczych)

$$Z_{dyn}^T = \{\sigma_E(t+1)\sqrt{2\pi}\}^{-1} \int_0^{\infty} \frac{\exp\{-[E' - \bar{E}(t+1)]^2 / [2\sigma_E^2(t+1)]\}}{1 + \exp\{-2,1(E'-9)\}} dE' \quad (2.6)$$

(gdzie wartości $\sigma_E(t+1)$ i $\bar{E}(t+1)$ są znane, gdyż zostały wyprognozowane, ponadto $E' = \log_{10} E$, a dolna granica całkowania może też być równa E_g , „elementarnej energii tąpnięcia” (Konopko 1994). Wielkość Z_{dyn}^T to zagrożenie dynamiczne tąpnięciem wskutek emisji sejsmicznej (więcej na ten temat napisano w końcowej części rozdz. 3).

Należy zwrócić jeszcze uwagę na liczbowe wartości prawdopodobieństwa tąpnięcia, określone równaniem (2.4) – zatem na podstawie statystyk wstrząsów i tąpnięć (Barański 2003; Patyńska 2001–2006): $E = 1 \cdot 10^4 \text{ J} \leftrightarrow P(T|E) = 0,0000275$; $E = 1 \cdot 10^5 \text{ J} \leftrightarrow P(T|E) = 0,000225$; $E = 1 \cdot 10^6 \text{ J} \leftrightarrow P(T|E) = 0,00183$; $E = 1 \cdot 10^7 \text{ J} \leftrightarrow P(T|E) = 0,0148$. Prawdopodobieństwa te wydają się bardzo małe, lecz w grę wchodzi ludzkie życie (tzn. czynniki pominięte, przekształcające definicję ryzyka w definicję zagrożenia), a w konkretnym zastosowaniu prawdopodobieństwo to może dotyczyć najbliższej godziny w konkretnej ścianie. Z tego właśnie powodu w definicji zagrożenia Z^T (rozdz. 2) zasugerowano, podając jako przykład, podział „przestrzeni (0–1) zagrożeń” na stany $(0-10^{-5}-10^{-3}-1)$: w ten sposób wystąpienie „czwórki” wyklucza „stan a”, a wystąpienie „szóstki” powoduje „ogłoszenie” stanu najwyższego zagrożenia. Powtórzyć jednak trzeba, że podział ten nie jest problemem z zakresu geofizyki.

Rysunek 1 warto porównać z rysunkiem 16 z publikacji (Konopko 1994), który wiąże pewien (wpływający na „skłonność do tąpnięć”) parametr c węgla z wytrzymałością R_c – porównanie takie podsuwa myśl o uogólnieniu zależności $P(T)$.

3. PRAWDOPODOBIEŃSTWO TĄPIŃCIA PO WSTRZĄSIE O ENERGII E W ZNANYCH WARUNKACH LOKALNYCH C_1, C_2, \dots – I METODA ROZEZNANIA GÓRNICZEGO

W rozdziale tym są stosowane – niezbyt lubiane przez inżynierów – pojęcia rachunku prawdopodobieństwa zmiennych losowych, których rozkłady mogą zależeć od wielu innych zmiennych (np. prawdopodobieństwo tąpnięcia może zależeć od energii wstrząsu i od wielu CKZ, zgodnie z IMRG). Czytelnik niezainteresowany detalami i „na wiarę” przyjmujący wyniki może się więc ograniczyć do wytłuszczonego tekstu.

Aby uniknąć dyskusji o definicji „oficjalnej”, można przyjąć że **tąpnięciem nazywa się zjawisko polegające na wystąpieniu „istotnych skutków”^{*} w następstwie wstrząsu sejsmicznego, w pewnych warunkach geologicznych i górniczych**. Ma się więc do czynienia ze zdarzeniem złożonym – z koniunkcją (lub iloczynem logicznym) w języku logiki klasycznej – ze zdarzeń lub „okoliczności” bardziej elementarnych (m.in. T, E, C_1, C_3, \dots) o czym trzeba pamiętać, określając zagrożenie Z^T tąpnięciem, czyli prawdopodobieństwo $P(T, E, C_1, C_3, \dots)$ tąpnięcia, gdyż jest to tak zwane prawdopodobieństwo łączne zdarzeń składowych.

Nie wszystkie wymienione w tablicy 1 IMRG czynniki muszą wystąpić równocześnie (w artykule zastosowano C_1, C_3) oraz założono, co jest zgodne z IMRG i zwyczaj prawdziwe, że poszczególne czynniki C_i są wzajemnie niezależne (to ważne: prawdopodobieństwo łączne staje się w takim przypadku iloczynem prawdopodobieństw brzegowych).

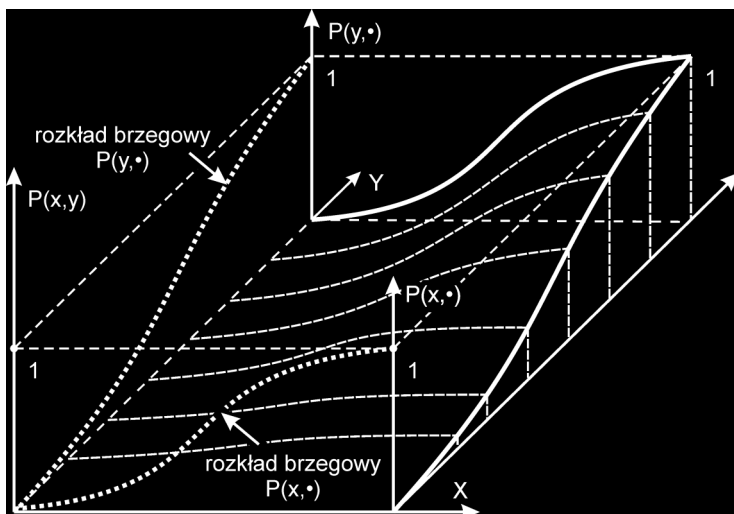
Teraz potrzeba nieco formalizmu: Benjamin i Cornell (1970, s. 79) – w odniesieniu do zmiennych o rozkładzie dyskretnym – napisali tak: „zachowanie się konkretnej zmiennej w rozkładzie łącznym, nie biorąc pod uwagę innych zmiennych, może być opisane za pomocą, tzw. **brzegowej funkcji prawdopodobieństwa**. Znajduje się ją, sumując wartości łącznej masy funkcji po wszystkich wartościach pominiętej zmiennej”. Jest to dokładnie zgodne z procedurą aproksymacji rozkładu (2.4), gdzie – dla każdej wartości E – sumowano wkład wszystkich zaobserwowanych zdarzeń o energii E , niezależnie od lokalnych wartości CKZ.

Rozkład $P(T | E)$, określony równaniem (2.4), jest więc aproksymacją rozkładu brzegowego $P(T | E, C_1 = \infty, C_3 = \infty \dots)$, a zapis ten oznacza, że o wartościach rozkładu brzegowego decydują maksymalne wartości nieuwzględnionych zmiennych.

Ponieważ zagadnienia wielowymiarowe i rozkłady brzegowe nie są zbyt popularne w geofizyce górniczej, na rysunku 2 przedstawiono szkic ułatwiający ich zrozumienie. Widać na nim dystrybuantę $P(X, Y)$ jako bryłę 3-D opartą na płaszczyźnie (X, Y) oraz rozkłady brzegowe $P(X, \cdot)$ i $P(Y, \cdot)$ jako rzuty (lub „cienie”) tej bryły na odpowiednich płaszczyznach prostopadłych. Należy zauważyć, że dla dowolnej wartości X , $P(X, \cdot) \leq 1$ (i analogicznie dla Y), a stąd w równaniach (3.7) i dalszych, czynniki $P_i(l_i) \leq 1$ dla dowolnych i oraz l_i , a ponadto $P_i(l_i) \rightarrow 1$ gdy $l_i \rightarrow \infty$ (lub do maksymalnej fizycznie możliwej wartości). Ogólnie, w przypadku niezależnych zdarzeń X, Y, Z, \dots

^{*} Definicja ta jest zbliżona do oficjalnej (Rozp. MSWiA z 14.06.2002 r.), lecz celowo nie zostało sprecyzowane co to są te „istotne skutki”, za to podkreślono, że tąpnięcie zawsze występuje w obecności jakichś CKZ; podkreślenie to jest potrzebne w dalszej części artykułu.

rozkład (zarówno gęstości, jak i dystrybuanty) prawdopodobieństwa zdarzenia złożonego jest iloczynem prawdopodobieństw brzegowych (zdarzeń składowych).



Rys. 2. Szkic ilustrujący rozkłady brzegowe $P(X, \cdot)$ i $P(Y, \cdot)$ (dystrybuanty) prawdopodobieństwa zdarzenia losowego (X, Y) złożonego z dwóch niezależnych zdarzeń losowych $(X$ oraz $Y)$, a także ułatwiający interpretację symboli $P(X, \cdot) \equiv P(X, \infty) \equiv P((X, Y) | Y \rightarrow \infty)$ i $P(Y, \cdot) \equiv P(Y, \infty) \equiv P((X, Y) | X \rightarrow \infty)$ jako rzutów rozkładu zdarzenia złożonego

Fig. 2. Sketch illustrating boundary distributions $P(X, \cdot)$ and $P(Y, \cdot)$ (cumulative distribution functions) of the probability of a random event (X, Y) composed of two independent random events $(X$ and $Y)$, and also facilitating the interpretation of symbols $P(X, \cdot) \equiv P(X, \infty) \equiv P((X, Y) | Y \rightarrow \infty)$ and $P(Y, \cdot) \equiv P(Y, \infty) \equiv P((X, Y) | X \rightarrow \infty)$ as projections of composed event distribution

Na rysunku 2 pokazano dystrybuantę, czyli skumulowany rozkład prawdopodobieństwa (oraz rozkłady brzegowe) zdarzenia złożonego z dwu zdarzeń składowych. Rysunków przedstawiających rozkłady w większej liczbie wymiarów (np. w 19 wymiarach), nie da się narysować, lecz zależności matematyczne nie ulegają zmianie.

W kontekście tej pracy dobrze jest wyobrazić sobie, że X to na przykład głębokość eksploatacji, a Y to R_c . Staje się wówczas widoczne, że zmiana liczby CKZ oznacza zmianę przedmiotu badań (!).

Z podstawowych praw rachunku prawdopodobieństwa (np. Fisz 1969; De Groot 1981) wynika, że

$$P(T, E, C_1, C_3) = P(T|E, C_1, C_3)P(E, C_1, C_3) \quad (3.1a)$$

$$P(E, C_1, C_3) = P(E|C_1, C_3)P(C_1, C_3) \quad (3.1b)$$

gdzie:

$P(E|C_1, C_3)$ to prawdopodobieństwo wystąpienia energii E w lokalnych warunkach C_1, C_3 ; tę wielkość – a dokładniej: $p[E^C((t + \Delta t), S)]$ – można sekwencyjnie (np. co godzinę) prognozować,

$P(C_1, C_3)$ to prawdopodobieństwo lokalnego wystąpienia warunków, o których wiadomo, że wystąpiły, zatem $P(C_1, C_3) \equiv 1$.

Równanie (3.1a) można więc zapisać w postaci

$$P(T, E, C_1, C_3) = P(T|E, C_1, C_3)P(E) \quad (3.1c)$$

lub stosując prognozowany rozkład gęstości energii $p(E)$

$$P(T, E, C_1, C_3) = \int_0^{\infty} p(T, E, C_1, C_3) dE \quad (3.2a)$$

$$P(T, E, C_1, C_3) = \int_0^{\infty} p(E)P(T|E, C_1, C_3) dE \quad (3.2b)$$

i na podstawie definicji zagrożenia tąpnięciem ($Z^T = P(T, E, C_1, C_3)$)

$$Z^T = \int_0^{\infty} p(E)P(T|E, C_1, C_3) dE \quad (3.3)$$

(można przypomnieć, że czynniki (CKZ) C_1 i C_3 reprezentują wszystkie czynniki zgodnie z IMRG, symbol E oznacza logarytm $\log_{10}E$ energii, a dolna granica całki, ściśle biorąc, powinna być równa $\log_{10}E_g$). W równaniu (3.3) wielkość $p(E)$ jest obliczana sekwencyjnie, zatem „znana”, należy jeszcze określić $P(T|E, C_1, C_3)$.

Z podstawowych praw rachunku prawdopodobieństwa i z założenia o niezależności czynników wynika, że prawdopodobieństwo zdarzenia złożonego (T, E, C_1, C_3) jest iloczynem prawdopodobieństw brzegowych:

$$P[T|E, C_1, C_3] = P[(T|E), C_1 = \bullet, C_3 = \bullet] P[(T|C_1), E = \bullet, C_3 = \bullet] P[(T|C_3), E = \bullet, C_1 = \bullet] \quad (3.4)$$

gdzie, aby uniknąć „bulwersujących” nieskończoności (∞) zastąpiono je symbolem \bullet , oznaczającym maksymalną fizycznie możliwą wartość. By zapis jeszcze bardziej skrócić, to samo równanie (3.4), można zapisać

$$P[T|E, C_1, C_3] = P[(T|E) \bullet\bullet] P[(T|C_1) \bullet\bullet] P[(T|C_3) \bullet\bullet] \quad (3.5)$$

Zgodnie z tym równaniem prawdopodobieństwo warunkowe tąpnięcia T , pod warunkiem wystąpienia (tu trzech: E, C_1, C_3) niezależnych zdarzeń $E, C_1, C_3 \dots$ jest iloczynem prawdopodobieństw brzegowych.

Należy zauważyć, że:

- obliczenie prawdopodobieństwa bezwarunkowego ($Z^T = P(T, E, C_1, C_3)$) wymaga pomnożenia (3.5) przez $p(E)dE$ i (całkowania),
- prawdopodobieństwo tąpnięcia jest zależne od energii i – zgodnie z MRG – od każdego z CKZ.

Wstawiając (3.5) do (3.3) otrzymuje się

$$Z^T = \int_0^{\infty} p(E)P[(T|E)\bullet\bullet]P[(T|C_1)\bullet\bullet]P[(T|C_3)\bullet\bullet]dE \quad (3.6a)$$

a wynosząc czynniki niezależne od energii przed znak całki

$$Z^T = P[(T|C_1)\bullet\bullet]P[(T|C_3)\bullet\bullet]\int_0^{\infty} p(E)P[(T|E)\bullet\bullet]dE \quad (3.6b)$$

gdzie $p(E)$ jest znane (gdyż wyprognozowane) i $P[(T|E)\bullet\bullet]$ jest określone równaniem (2.4). Każdy z czynników w równaniu (3.6b) jest rozkładem (brzegowym) prawdopodobieństwa (tapnięcia w zależności od lokalnej wartości danego CKZ), jest więc z definicji zawarty w przedziale $(0, 1)$, zatem $0 \leq Z^T \leq 1$.

Interpretacja równania (3.6b):

By ułatwić zrozumienie równania (3.6b) trzeba podkreślić, że rozkład brzegowy (zmiennej N -wymiarowej) nie jest N -wymiarowym rozkładem tej zmiennej, tak jak cień bryły 3D (lub jej rzut prostopadły) – rysunek 2 – nie jest tą bryłą. Pomijając znak całki i symbol dE , równanie (3.6b) można interpretować jako równanie określające masę (np. masę w [kg] lub masę prawdopodobieństwa) prostopadłościanu, którego trzy wzajemnie prostopadłe krawędzie odpowiadają rozkładowi brzegowym trzech wzajemnie niezależnych wielkości (mianowicie $(T|E)$, $(T|C_1)$, $(T|C_3)$), natomiast $p(E)$ to gęstość (np. masy [kg/m³] lub prawdopodobieństwa).

By chwilowo uwolnić się od terminologii probabilistycznej, poniżej zastosowano oznaczenia $P_i(l_i) \equiv P[(T|C_i)\bullet\bullet]$, zatem (3.6b) ma postać

$$Z^T = P_1(l_1)P_3(l_3)\int_0^{\infty} p(E)P[(T|E)\bullet\bullet]dE \quad (3.7)$$

gdzie wielkości $P_i(l_i)$ – które dla ustalonych i oraz l_i przyjmują konkretne wartości liczbowe – nazywa się lokalnym „wzmocnieniem” zagrożenia wskutek przyjęcia przez i -ty CKZ (lokalnie) wartości $l_i \equiv C_{ii}$ (np. wskutek przyjęcia przez zmienną „głębokość eksploatacji” lokalnej wartości 800 m). Słowo „wzmocnienie” występuje w cudzysłowie, gdyż, zgodnie z przykładem bryły 3D (powyżej), każdy czynnik C_i (zatem także $P(l)$) występuje w innym wymiarze. Ponieważ $P(l) \leq 1$, tę wielkość można też nazywać – tłumieniem zagrożenia. Nieco ściślej należy napisać, że w zagadnieniach o ustalonej liczbie M (np. $M = 19$ lub $M = 2$) wymiarów (a w tym przypadku czynników CKZ) rozkłady brzegowe $P_i(l)$ mogą być interpretowane i badane jako funkcje określające „wzmocnienie” zagrożenia Z^T przez i -ty CKZ, a dla ustalonych wartości l_i – jako współczynniki wzmocnienia. Analiza zagrożenia w zmiennej liczbie wymiarów wydaje się problemem raczej teoretycznym niż praktycznym, zbliżonym do porównywania masy brył określonych każda w innej liczbie wymiarów i nie jest w artykule opisywana. Trzeba więc powtórzyć, że w zadaniu analizy lub prognozy Z^T , **pierwszym krokiem musi być określenie czynników CKZ, które w zadaniu tym występują. Zmiana czynników lub zmiana liczby czynników, oznacza zmianę problemu, a wartości Z^T wyznaczone, rozwiązując różne**

problemy, są nieporównywalne (tak jak nie można porównywać liczby tąpnięć przypadającej na ustalony przedział energii, $N(\Delta E)$, z liczbą tąpnięć, przypadającą na przedział energii i przedział R_c , $N(\Delta E, \Delta R_c)$).

Podobnie jak w rozdziale 2, rozkład (dystrybuantę) prawdopodobieństwa $P_i(l)$ aproksymuje się funkcją logistyczną

$$P_i(l) = \frac{1}{1 + \exp(-Q(l))} \quad (3.8a)$$

która w przypadku, gdy zmienna l (np. głębokość eksploatacji) przyjmuje konkretną wartość liczbową l_i , też przyjmuje konkretną wartość

$$P_i(l_i) = \frac{1}{1 + \exp(-Q_{il})} \quad (3.8b)$$

gdzie Q_{il} to „punkty”, które zgodnie z IMRG przypisuje się i -temu CKZ, gdy przyjmuje on wartość l_i . Łatwo można sprawdzić, że gdy $Q_{il} \rightarrow -\infty$ to $P_i(l_i) \rightarrow 0$, a gdy $Q_{il} \rightarrow \infty$ to $P_i(l_i) \rightarrow 1$. Spełnione są więc zawsze warunki $0 \leq P_i(l_i) \leq 1$ oraz $0 \leq Z^T \leq 1$, a wzrost wartości C_{il} (np. dla $i = 1$ oznacza to wzrost głębokości eksploatacji), powodujący wzrost „wagi punktowej”, powoduje też zwiększenie zagrożenia tąpnięciem.

Z równań (3.8a, b) można łatwo wyznaczyć zarówno funkcję

$$Q_i(l) = \ln \frac{P_i(l)}{1 - P_i(l)} \quad (3.9a)$$

jak i jej konkretną wartość, gdy i -ty CKZ przyjmuje wartość l_i

$$Q_{il} = \ln \frac{P_i(l_i)}{1 - P_i(l_i)} \quad (3.9b)$$

Zatem: **Waga punktowa (lub „punkty”) Q_{il} w tablicy 1 IMRG, stanowi logitowe przekształcenie* lokalnego wzmocnienia $P_i(l_i)$ zagrożenia tąpnięciem**, wyłącznie wskutek przyjęcia przez i -ty CKZ lokalnej wartości l_i . Formalnie: waga „punktowa” Q_{il} jest logitową transformacją brzegowego prawdopodobieństwa $P[(T | C_i) \bullet \bullet]$.

Ponieważ w licznych publikacjach autora (także w Kornowski, Kurzeja 2008, s. 12) nazwa „**zagrożenie sejsmiczne**” i symbol Z^S są zdefiniowane jako **prawdopodobieństwo przewyższenia przez energię wstrząsu – lub inną miarę intensywności – lokalnie określonego „proggu bezpieczeństwa”**, to aby nie wprowadzić zamieszania w terminologii, **proponuje się, dla zazwyczaj szybkozmiennnej wielkości**

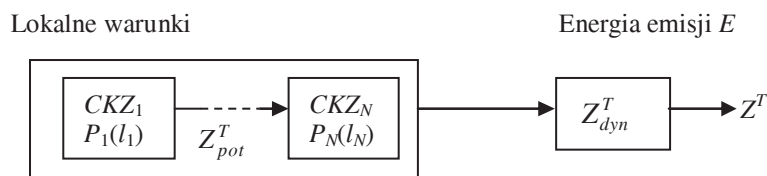
* Równania (3.9a, b) są w literaturze nazywane transformacją logitową lub nawet krócej – logitem. W terminologii zakładów sportowych **szansa** sukcesu sportowca A w starciu z B: jest to iloraz $P_A/(1 - P_A)$, gdzie P_A to prawdopodobieństwo sukcesu A. Zatem „waga punktowa” Q_{il} jest to logarytmiczna szansa tąpnięcia określona tylko i wyłącznie na podstawie lokalnej wartości (l_i) i -tego CKZ, z pominięciem innych czynników wraz z sejsmicznością.

$$P[(T|E), E] = \int_0^{\infty} p(E)P[(T|E) \bullet \bullet]dE \quad (3.10)$$

określającej zagrożenie tąpnięciem, wynikające z samej tylko emisji energii E lecz z pominięciem wpływu warunków lokalnych (czyli CKZ) **nazwę „zagrożenie dynamiczne”** (tąpnięciem) **i symbol** Z_{dyn}^T (2.6). Stosując, zgodnie z IMRG, nazwę „**zagrożenie potencjalne”** i symbol Z_{pot}^T dla iloczynu $\{P_i(l_i) \dots\}$ w równaniu (3.7), można równanie to przedstawić w postaci

Z^T	=	Z_{pot}^T	Z_{dyn}^T	(3.11a)
(Bezwarunkowe) zagrożenie tąpnięciem	=	(Statyczne) zagrożenie potencjalne wynikające tylko z warunków eksploatacji	Zagrożenie dynamiczne wynikające tylko z emisji wstrząsów	(3.11b)
Z^T	=	$\{P_1(l_1) \dots P_i(l_i) \dots\}$	$\int_0^{\infty} p(E)P[(T E) \bullet \bullet]dE$	(3.11c)

Należy dodać, że przedstawiona w artykule interpretacja CKZ jako niezależnych czynników wzmacniających, pozwala badać je jako elementy kanału informacyjnego – jak to pokazano na rysunku 3 – co stwarza nowe możliwości badawcze, lecz wykracza poza zakres tego artykułu.



Rys. 3. Przepływ informacji o zagrożeniu tąpnięciem w ustalonych warunkach

Fig. 3. Sketch illustrating the flow of information about the rockburst hazard in stationary conditions

Otrzymano w ten sposób w pełni formalny i spójny opis estymacji/prognozy zagrożenia $Z^T \equiv P(T, E, C_1, C_3 \bullet \bullet \bullet)$, w którym istotnym składnikiem jest informacja o lokalnych warunkach geologicznych i górniczych, uzyskana dzięki zastosowaniu MRG, a także spójną interpretację MRG i „punktów”, które, zgodnie z metodą, są przypisywane różnym wartościom czynników kształtujących zagrożenie.

4. PODSUMOWANIE

Metoda Rozeznania Górniczego (MRG) jest uproszczoną metodą, polegającą na wykorzystaniu do oceny zagrożenia tąpnięciami – zebranych dzięki wieloletnim obserwacjom – informacji („wiedzy eksperckiej”) o niezależnych z założenia, geologicznych i górniczych Czynnikiach Kształtujących Zagrożenie (CKZ).

Traktując IMRG „na serio i dosłownie” informację tę – jak wykazano w tym artykule – dla każdego i -tego CKZ formalnie reprezentuje rozkład brzegowy $P_i(l)$ praw-

dopodobieństwa tąpnięcia. Rozkłady te, a jest ich zawsze tyle, ile jest lokalnie występujących CKZ, multiplikatywnie (przez mnożenie) modyfikują zagrożenie dynamiczne Z_{dyn} – określone metodami geofizyki, a wynikające z szybkozmiennej emisji energii w procesach niszczenia skały – zgodnie z (4.1) (patrz także 3.11a, b, c), umożliwiając łatwe obliczenie Z^T (bezw warunkowego) zagrożenia tąpnięciem

$$Z^T = \{P_1(l_1)P_2(l_2)\dots\}Z_{dyn}^T \quad (4.1)$$

Punkty (Q_{il}), które zgodnie z IMRG przypisuje się różnym wartościom (l_i) każdego (i -tego) CKZ lub klasom wartości CKZ, umożliwiają aproksymację odpowiedniego rozkładu brzegowego $P_i(l)$, jednoznacznie określoną funkcją logistyczną.

Można jednak – i, zdaniem autora, jest to nieuniknione – odstąpić od dosłownego traktowania IMRG. Staje się wówczas oczywiste, że „punkty” są tworem niefizycznym i zbędnym, a istotny jest związek między (zazwyczaj ciągłą) zmienną (l_i) objaśniającą (którą może być np. głębokość) a prawdopodobieństwem brzegowym $P_i(l_i)$. Stwarza to możliwość parametryzacji rozkładów – jak w równaniu (2.3) – i optymalizacji parametrów, **co nazywa się kalibracją MRG**, a także analizy (możliwej w pewnych przypadkach) korelacji między „czynnikami kształtującymi zagrożenie”. Zagadnienia te wymagają jednak osobnych badań i zgromadzenia wielu danych.

W książce Kornowskiego i Kurzeji (2008, s. 149) zaproponowano formalizację MRG przez bezpośrednie uogólnienie równania (2.3), wprowadzając wektor czynników w miejsce samej tylko energii, występującej w (2.3). Wymaga to jednak dostępu do informacji (o wstrząsach i o tąpnięciach), którymi aktualnie autor nie dysponuje. Być może sposób zaproponowany w tym artykule – polegający na bezpośrednim wykorzystaniu informacji zawartych w IMRG, a w szczególności „punktów”, okaże się łatwiejszy w implementacji.

5. WNIOSKI

1. Dopuszczalna jest ostrożna „inżynierska” interpretacja liczbowych wartości $P_i(l_i)$ jako lokalnego wzmocnienia zagrożenia tąpnięciem, wnoszonego (tylko i wyłącznie) przez i -ty CKZ, przyjmujący lokalnie wartości l_i . Addytywna waga punktowa Q_{il} (lub „punkty” Q_{il} – tablica 1 IMRG) stanowi logitowe przekształcenie (3.9b) lokalnego wzmocnienia $P_i(l_i)$. **Sumowanie punktów $\sum_i Q_{il}$, należy interpretować jako sumowanie logarytmicznych szans tąpnięcia** wskutek oddziaływania samych tylko czynników C_i . Szanse tąpnięcia to $P(T)/(1 - P(T))$ – patrz odnośnik na str. 58. Wartość $Q = 0$ nie zmienia Z^T ani szans tąpnięcia. Gdy $Q_i = 0$, to $P_i = 1/2$ i jest to „neutralna” wartość prawdopodobieństwa zdarzenia dychotomicznego.
2. Logarytmowanie równania (4.1) powoduje przekształcenie mnożenia w dodawanie, co stanowi uzasadnienie (stosowanego w MRG) sumowania przekształconych, zgodnie z (3.9), „punktów” i podziału logarytmu bezwarunkowego zagrożenia tąpnięciem na sumę logarytmów „potencjalnego” zagrożenia tąpnięciem i „dynamicznego” zagrożenia tąpnięciem

$$\ln Z^T = \left\{ \sum_i \ln P_i(l_i) \right\} + \ln Z_{dyn} \quad (5.1a)$$

$$\ln Z^T = - \sum_i \ln(1 + e^{-Q_{it}}) + \ln Z \quad (5.1b)$$

(gdzie Q_{it} to „punkty” według IMRG, Z_{dyn} to „dynamiczne” zagrożenie tąpnięciem, określone metodami sejsmologii i sejsmoakustyki – nie mylić z „zagrożeniem sejsmicznym”, które wiąże się z przewyższeniem prognozy E_g przez energię).

3. Definicja zagrożenia (Z^T) tąpnięciem, a także podane estymatory/predyktory gwarantują, że $0 \leq Z^T \leq 1$, niezależnie od możliwych błędów danych i obserwacji, zatem zawsze jest możliwy podział „przestrzeni zagrożeń” (0–1) na odcinki (np. A, B, C...) zwane „stanami zagrożenia tąpnięciem”, ułatwiając decyzje o profilaktyce. Sposób podziału przestrzeni (0–1) na stany, wpływa na ekonomikę i bezpieczeństwo produkcji – nie jest więc zadaniem z zakresu geofizyki.
- 4a. Łącząc informację o zagrożeniu potencjalnym (wnoszona przez MRG) z geofizyczną prognozą energii $p\{E^C [(t, t + \Delta t), S]\}$ oraz ze statystyczno-historyczną informacją o zależności „dynamicznego” zagrożenia tąpnięciem $P(T|E)$ od wyprognozowanej energii $E^C [(t, t + \Delta t), S]$, otrzymano w pełni spójną, formalną metodę prognozowania lokalnego zagrożenia tąpnięciem $Z^T [(t, t + \Delta t), S]$, zdefiniowanego jako prawdopodobieństwo tąpnięcia w okresie $(t, t + \Delta t)$ w obszarze S . Poza informacją uzyskaną za pomocą metody „wierceń małośrednicowych”, przedstawiona metoda obejmuje – lub może w prosty sposób objąć – całość obecnie dostępnej „operacyjnie użytecznej” wiedzy o zagrożeniu tąpnięciem w praktyce, ujętej w Metodzie Kompleksowej.
- 4b. Dla każdego minionego tąpnięcia, którego dane (energia i parametry CKZ) są dostępne w Archiwum Tapań lub w kopalni, bardzo łatwo można obliczyć (korzystając z „punktów”, tabl. 1 IMRG i z równań (3.8b), (2.3) i (4.1)) wartość Z^T oraz stan zagrożenia w miejscu i w chwili tąpnięcia. Dokładnie to samo dotyczy zdarzeń przyszłych, jeżeli obliczono krótkookresową prognozę energii. **Wniosek ten podkreśla ważność gromadzenia (określonych w IMRG) danych o silnych wstrząsach i tąpnięciach. Takie właśnie dane są niezbędne do kalibracji MRG.**
5. Wprowadzenie do opisaney metody nowej informacji o nieuwzględnionych dotąd – niezależnych czynnikach (CKZ) lub metodach – np. estymacji (względnego) naprężenia – jest łatwe, podobnie jak ewentualna korekcja wzmocnień/punktów. Wprowadzenie, być może istniejących, zależności międzyczynnikowych, wymaga najpierw ich ilościowego określenia na podstawie obserwacji.
6. Z formalizmu matematycznego metody wynika, że jakość (zawsze możliwych do obliczenia) ilościowych prognoz zagrożenia tąpnięciem zależy od częstości udostępniania danych geofizycznych algorytmowi prognozującemu energię (zatem Z_{dyn}^T) oraz od jakości danych:
 - pochodzących z sejsmologii i sejsmoakustyki, a dotyczących energii minionej/zaobserwowanej emisji,
 - uzyskanych z MRG, a dotyczących wpływu CKZ na „potencjalne” (aprioryczne) zagrożenie tąpnięciem.

Literatura

1. Barański A. (2003): Analiza zmian stanu zagrożenia tąpnięciami w latach 1994–2003 w kopalniach tworzących obecnie Kompanię Węglową S.A. Tąpnięcia 2003. Katowice, GIG.
2. Barański A., Drzewiecki J., Kabiesz J., Konopko W., Kornowski J., Krzyżowski A., Mutke G. (2007): Zasady stosowania metody kompleksowej i metod szczegółowych oceny stanu zagrożenia tąpnięciami w kopalniach węgla kamiennego. Główny Instytut Górnictwa: Seria Instrukcje nr 20.
3. Benjamin J.R., Cornell C.A. (1977): Rachunek prawdopodobieństwa, statystyka matematyczna i teoria decyzji dla inżynierów. Warszawa, WNT.
4. Box G.E.P., Jenkins G.M. (1983): Analiza szeregów czasowych. Warszawa, PWN.
5. De Groot M.H. (1981): Optymalne decyzje statystyczne. Warszawa, PWN.
6. Feller W. (1966): Wstęp do rachunku prawdopodobieństwa. Warszawa, PWN.
7. Fisz M. (1969): Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna. Warszawa, PWN.
8. Hosmer D.W., Lemeshow S. (1989): Applied Logistic Regression. New York, J. Wiley.
9. Konopko W. (1994): Doświadczalne podstawy kwalifikowania wyrobisk górniczych w kopalniach węgla kamiennego do stopni zagrożenia tąpnięciami. Prace Naukowe GIG nr 795.
10. Kornowski J. (2003): Linear prediction of aggregated seismic and seismoacoustic energy emitted from a mining longwall. Acta Montana, Series A, No. 22 (129), s. 5–14.
11. Kornowski J. (2009): Formalizacja „metody rozeznania górniczego” i górniczo-geofizyczna prognoza zagrożenia tąpnięciem. Górnicze Zagrożenia Naturalne 2009. Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko nr 4/2, s. 120–129.
12. Kornowski J., Kurzeja J. (2008): Krótkookresowa prognoza zagrożenia sejsmicznego w górnictwie. Katowice, GIG.
13. Kurzeja J. (2005): Sekwencyjna prognoza energii sejsmicznej generowanej eksploatacją pokładu węgla. Prace Naukowe GIG nr 867.
14. Patyńska R. (2001): Zagrożenie tąpnięciami. W: Raport roczny (2000) o stanie podstawowych zagrożeń naturalnych i technicznych w górnictwie węgla kamiennego. Praca zbiorowa pod kier. W. Konopko. Katowice, GIG.
15. Patyńska R. (2002): Zagrożenie tąpnięciami. W: Raport roczny (2001) o stanie podstawowych zagrożeń naturalnych i technicznych w górnictwie węgla kamiennego. Praca zbiorowa pod kier. W. Konopko. Katowice, GIG.
16. Patyńska R. (2003): Zagrożenie tąpnięciami. W: Raport roczny (2002) o stanie podstawowych zagrożeń naturalnych i technicznych w górnictwie węgla kamiennego. Praca zbiorowa pod kier. W. Konopko. Katowice, GIG.
17. Patyńska R. (2004): Zagrożenie tąpnięciami. W: Raport roczny (2003) o stanie podstawowych zagrożeń naturalnych i technicznych w górnictwie węgla kamiennego. Praca zbiorowa pod kier. W. Konopko. Katowice, GIG.
18. Patyńska R. (2005): Zagrożenie tąpnięciami. W: Raport roczny (2004) o stanie podstawowych zagrożeń naturalnych i technicznych w górnictwie węgla kamiennego. Praca zbiorowa pod kier. W. Konopko. Katowice, GIG.
19. Patyńska R. (2006): Zagrożenie tąpnięciami. W: Raport roczny (2005) o stanie podstawowych zagrożeń naturalnych i technicznych w górnictwie węgla kamiennego. Praca zbiorowa pod kier. W. Konopko. Katowice, GIG.
20. Surma A., Kornowski J., Kurzeja J. (2003): Zastosowanie teorii pola emisji do estymacji energii sejsmicznej i prognozy zagrożenia sejsmicznego. W: Zagrożenia naturalne w górnictwie. Kraków, IGSMiE PAN, s. 365–380.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Józef Kabiesz