

Władysław KONOPKO, Janusz MAKÓWKA
Główny Instytut Górnictwa, Katowice

PRAWDOPODOBIENSTWO TĄPNIECIA W KOPALNIACH WĘGLA KAMIENNEGO

Streszczenie. W polskim górnictwie węgla kamiennego dobrym wskaźnikiem stanu zagrożenia tapaniami jest aktywność sejsmiczna generowana robotami górniczymi. Artykuł prezentuje statystykę rocznego wydobycia węgla, aktywności sejsmicznej, tąpnięć i związanych z nimi wypadków wśród załogi. Zauważono, że na przestrzeni lat 1980-99 zarówno emisja energii sejsmicznej, jak i wydobycie zmieniały się, lecz nie w sposób skorelowany. Natomiast ryzyko wypadku (śmiertelnego lub innego) ma swoje maksimum dla tąpnięć przy wstrząsach o energii rzędu 10^7 J. Zdaniem autorów jest to spowodowane słabszą zależnością wstrząsów regionalnych o energiach rzędu 10^8 - 10^9 J od bieżącej eksploatacji i większym ich oddaleniem od miejsc pracy górników.

ROCK BURST RISK ASSESSMENT IN COAL MINES

Summary. Annual statistic of coal production, seismic activity, rock burst and the relating incidents has been presented in the article. It has been noticed that both seismic energy and coal production decreased over 1980-99, but without any special correlation. However, incident hazard (mortal or the other) is maximal for rock bursts of the energy of the order of 10^7 J.

1. Wstęp

Stan zagrożenia tapaniami robót górniczych warunkowany jest szeregiem czynników natury geologiczno-górnicznej i techniczno-organizacyjnej.

Wszeczhronne badania i praktyka górnicza pozwalają na sporządzenie rankingu czynników warunkujących obiektywnie istniejący stan zagrożenia tapaniami:

- ciśnienie górotworu: pierwotne (głębokość zalegania i zaburzenia geologiczne) i wtórne (zaszłości eksploatacyjne),

- grube monolityczne o wysokiej wytrzymałości warstwy skalne otaczające złoże, w szczególności warstwy stropowe,
- grube o wysokiej wytrzymałości złoże, w szczególności pokłady węgla.

Prowadzone w tych warunkach roboty górnicze z reguły poprzedzane są odpowiednio dobranymi zabiegami profilaktyki tąpaniowej. Ponadto część zabiegów realizowana jest w trakcie prowadzenia robót.

Profilaktykę tąpaniową należy przy tym rozumieć szeroko - od właściwego projektowania robót, w szczególności wykorzystującego efekt eksploatacyjnego odprężenia złoża, poprzez odpowiedni dobór technologii ich prowadzenia (gabarytów wyrobisk, sposobu urabiania, środków i sposobów obudowy, prędkości postępu przodków itp.) do aktywnych i pasywnych metod profilaktyki. Jako aktywną profilaktykę rozumie się destrukcję struktury złoża i skał otaczających osiąganą technikami, hydrauliczną, wiertniczą bądź strzelniczą. Do tej grupy profilaktyki zaliczyć można również prowokowanie wstrząsów górotworu techniką strzelniczą. W szczególnych przypadkach mogą to być również sprowokowane tąpnięcia (podczas nieobecności załogi w miejscach zagrożonych). Pasywną (bierną) profilaktykę osiąga się środkami techniczno-organizacyjnymi poprzez odpowiednie szkolenie, uświadomienie załodze miejsc o podwyższonym stanie zagrożenia, ograniczenie do niezbędnego minimum liczby pracowników ekspozowanych na zagrożenie bądź nawet całkowite wyłączenie z ruchu załogi niektórych wyrobisk lub ich odcinków.

W tych warunkach tąpnięcia mogą wystąpić w zasadzie w przypadkach niewłaściwej oceny stanu zagrożenia, niewłaściwie dobranej bądź niedostatecznie intensywnej profilaktyki tąpaniowej. Nie można przy tym zapominać, że złożoność przyczyn stanu zagrożenia tąpnięciami powoduje, iż praktycznie nie ma możliwości jednoznacznego określenia wszystkich czynników warunkujących w danym miejscu i czasie stan zagrożenia tąpnięciami. Zawsze prowadzeniu robót górniczych towarzyszyć będzie ryzyko katastrofy, większe lub mniejsze prawdopodobieństwo wystąpienia tąpnięcia jako zjawiska przyrodniczego, a nie deterministycznego, dającego się jednoznacznie określić, sparametryzować.

2. Sejsmiczność indukowana a zagrożenie tąpnięciami w kopalniach węgla kamiennego

Każdemu tąpnięciu towarzyszy wstrząs górotworu, natomiast rzadko który wstrząs górotworu powoduje tąpnięcie. Zatem tąpnięcia są podzbiorem zbioru wstrząsów.

Jednocześnie wstrząsy górotworu mogą być ogólnie dostępną miarą stanu zagrożenia tapaniami. Dla uzyskania względnie miarodajnych ocen w tym zakresie konieczne jest uwzględnienie obszernego zbioru danych. Prześledźmy więc zdarzenia zaistniałe w kopalniach węgla kamiennego w latach 1980-1999 (tablica 1). W okresie tym z kopalń wydobyto 3 180,9 mln ton węgla handlowego, zarejestrowano 31 188 wstrząsów o energii $E \geq 10^5 J$ o łącznym wydatku energetycznym $E \sim 1,025 \cdot 10^{11} J$. Wystąpiły 262 tąpnięcia, które spowodowały 152 wypadki śmiertelne i 780 pozostałych wypadków.

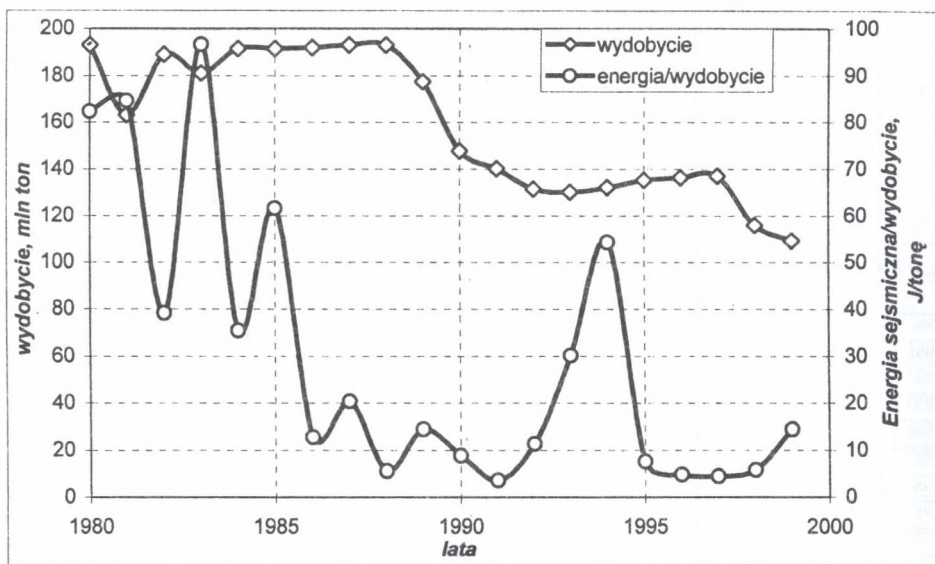
Tablica 1

Charakterystyka sejsmiczności i tąpnięć w Górnos Śląskim Zagłębiu Węglowym w okresie 1980+1999 [2,8]

Rok	Wydobycie mln ton	Liczba wstrząsów górotworu o energii rzędu						Suma energii, J	Liczba tąpnięć, n_t	Liczba wypadków śmiertelnych
		$10^5 J$	$10^6 J$	$10^7 J$	$10^8 J$	$10^9 J$	Razem			
1980	193,1	2855	531	40	5	1	3432	$1.59 \cdot 10^{10}$	22	7
1981	163,0	2004	296	31	4	1	3436	$1.38 \cdot 10^{10}$	28	4
1982	189,2	2262	251	28	4	0	2545	$7.43 \cdot 10^9$	19	29
1983	181,1	2400	319	25	4	1	2749	$1.75 \cdot 10^{10}$	14	4
1984	191,6	2657	293	16	2	2	2970	$6.81 \cdot 10^9$	13	18
1985	191,6	2256	202	18	2	2	2480	$1.18 \cdot 10^{10}$	15	8
1986	192,1	1740	228	26	3	1	2001	$2.48 \cdot 10^9$	27	21
1987	193,0	2015	204	36	5	0	2260	$3.95 \cdot 10^9$	13	7
1988	193,0	1471	113	15	0	0	1599	$1.1 \cdot 10^9$	14	3
1989	177,6	973	91	10	2	0	1076	$2.58 \cdot 10^9$	15	7
1990	147,7	960	71	5	2	0	1038	$1.32 \cdot 10^9$	16	6
1991	140,1	823	37	3	1	0	864	$5.07 \cdot 10^8$	8	6
1992	131,5	722	53	7	0	1	833	$1.5 \cdot 10^9$	10	9
1993	130,2	838	83	6	3	2	932	$3.94 \cdot 10^9$	18	9
1994	132,2	671	74	6	1	0	752	$7.18 \cdot 10^9$	12	4
1995	135,3	385	70	8	2	0	465	$1.04 \cdot 10^9$	7	6
1996	136,3	499	54	11	0	0	564	$6.61 \cdot 10^8$	2	3
1997	137,1	464	78	5	0	0	547	$6.24 \cdot 10^8$	2	-
1998	116,0	572	86	5	0	0	663	$6.79 \cdot 10^8$	5	1
1999	109,2	941	183	10	1	0	1135	$1.59 \cdot 10^9$	2	-

Z danych tablicy 1 i sporządzonego na jej podstawie rysunku 1 wynika, że aktywność sejsmiczna górotworu generowana robotami górniczymi wykazuje zdecydowany trend malejący, jednakże zmienny w czasie. W analizowanym okresie najwyższą aktywność sejsmiczną zanotowano w roku 1983. Jej wartość wyniosła 96,9 J/t wydobycia węgla handlowego. Natomiast najniższą aktywność stwierdzono w roku 1991-3,6 J/t. Na bardzo niskim poziomie kształtowała się też aktywność sejsmiczna górotworu w latach 1995+98 (4,5+7,7 J/t). Przyczyny tak istotnego zmniejszenia aktywności sejsmicznej górotworu nie można wiązać wyłącznie ze zmniejszeniem wielkości wydobycia. W latach 1984+1988 kształtowało się ono na zbliżonym poziomie 191,6+193,0 mln ton, podczas gdy aktywność

sejsmiczna w tym okresie zmniejszyła się z 61,5 J/t w roku 1985 do 5,7 J/t w roku 1998. Nie można też znaleźć współzależności pomiędzy zdecydowanym zwiększeniem aktywności sejsmicznej górotworu w latach 1993, 1994 czy 1999 a wielkością wydobycia. Problem ten wymaga oddzielnego opracowania.



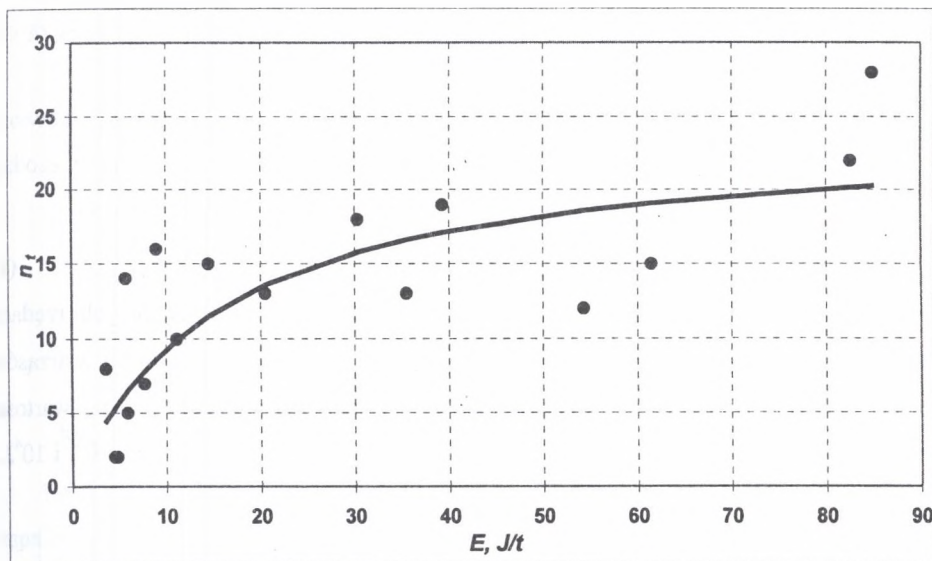
Rys. 1. Wydobycie i aktywność sejsmiczna górotworu w kopalniach węgla kamiennego

Niezależnie od wymienionej zmienności - aktywność sejsmiczna górotworu może stanowić miarę stanu zagrożenia tąpnięciami (rys. 2). Podobny wniosek - dla określonych pól eksploatacyjnych - przedstawił Z. Gerlach [1].

3. Prawdopodobieństwo tąpnięcia

Przy całej złożoności przyczyn wystąpienia tąpnięcia - najbardziej miarodajnym, sumarycznym miernikiem stanu zagrożenia tąpnięciami jest aktywność sejsmiczna górotworu. W oparciu o nią W. Konopko [4] zaproponował sposób określania prawdopodobieństwa wystąpienia tąpnięcia. Jego podstawę stanowiły zdarzenia z lat 1977-83. Szersza baza pomiarowa pozwoli na uściślenie tej zależności [6]. Stanowią ją dokumentacje wstrząsów, tąpnięć i wypadków z lat 1980-1999 (tablica 2) [2]. W okresie tym stabilna była technika eksploatacji, zmieniała się natomiast wielkość wydobycia od 193,1 mln ton w roku 1980 do

109,2 mln ton w roku 1999. Jednocześnie można wyróżnić dwa okresy stabilizacji wydobywania w latach 1984+1988 na poziomie 191,6+193,0 mln ton i w latach 1992+1997 na poziomie 131,5+137,1 mln ton.



Rys. 2. Zależność liczby tąpnięć od aktywności sejsmicznej górotworu (pominięto dane z lat 1983, 1986 i 1999, w których liczba i energia wstrząsów i liczba tąpnięć zdecydowanie odbiegały od prawidłowości tego zbioru)

Tablica 2
Tąpnięcia i spowodowane nimi wypadki w kopalniach węgla kamiennego w latach 1980-1999

Rząd energii wstrząsów, J	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8	10^9
Średnia roczna liczba wstrząsów n_w	67 424*	8 874*	1375,40	165,85	15,55	2,05	0,55
Średnia wartość energii wstrząsów	$5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^7$	$4,5 \cdot 10^8$	$4,6 \cdot 10^9$
Średnia roczna liczba tąpnięć, n_t	0,10	1,35	4,50	4,75	1,90	0,30	0,20
Średnia wartość energii wstrząsu przy tąpnięciu, J	$6,50 \cdot 10^3$	$4,93 \cdot 10^4$	$4,29 \cdot 10^5$	$3,24 \cdot 10^6$	$2,84 \cdot 10^7$	$4,17 \cdot 10^8$	$5,25 \cdot 10^9$
Średnia roczna liczba wypadków śmiertelnych	0,10	0,55	2,35	2,50	2,00	0,05	0,05
Średnia roczna liczba wypadków pozostałych	0,10	2,65	12,20	15,20	8,00	0,15	0,70

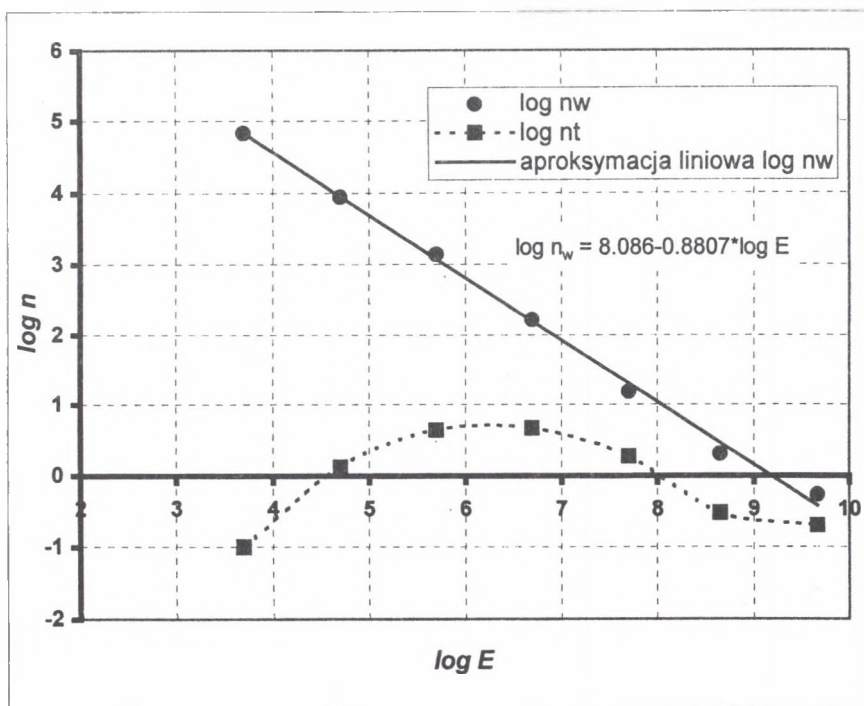
*) liczby obliczone z równania Gutenberga-Rychtera $\log n_w = 8,0865 - 0,8807 \log E$

W latach 1980+1999 dwa tapnięcia wystąpiły przy energii wstrząsu rzędu 10^3 J. Średnia energia wstrząsów górotworu towarzysząca tym tapnięciom wyniosła $6,5 \cdot 10^3$ J. Przy średniej energii wstrząsu rzędu $5,28 \cdot 10^4$ J zanotowano aż 25 tapnięć. Ich maksymalną liczbę zanotowano przy wstrząsach rzędu 10^6 J (92). Równocześnie nie każdy wstrząs nawet o energii rzędu 10^9 J powodował tapnięcie. W tabelicy 2 podano średnie wartości wstrząsów górotworu towarzyszących tapnięciu zgodne z ich dokumentacją [2,8].

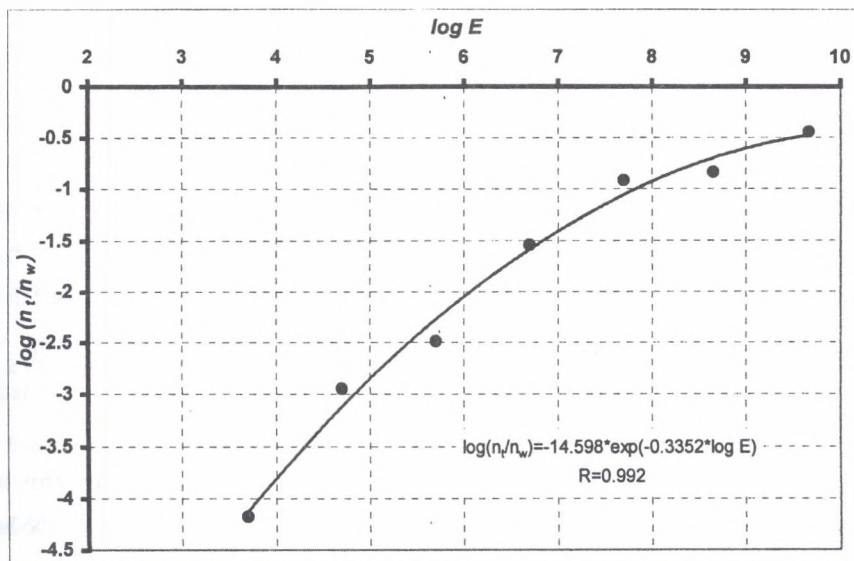
W Głównym Instytucie Górnictwa są dokumentowane centralnie wstrząsy górotworu o energii nie mniejszej od 10^5 J. Rozkład liczby wstrząsów od ich energii w zasadzie zgodny jest z zależnością Gutenberga-Rychtera (rys. 3). Można go opisać równaniem (rys. 4)

$$\log n_w = 8,0865 - 0,8807 \log E \quad (1)$$

Równanie to określono przyjmując średnie wartości energii w poszczególnych rzędach wstrząsów często występujących, to jest $5 \cdot 10^3$ J, $5 \cdot 10^4$ J ... $5 \cdot 10^7$ J. Natomiast dla wstrząsów sporadycznie występujących o energiach rzędu 10^8 J i 10^9 J uwzględniono średnie wartości energii ich zbiorów. Z równania (1) obliczono liczby wstrząsów o energiach rzędów 10^3 J i 10^4 J.



Rys. 3. Zależność średniej rocznej liczby wstrząsów n_w i liczby tapnięć n_t



Rys. 4. Prawdopodobieństwo wystąpienia tąpnięcia w zależności od liczby wstrząsów i ich energii

Iloraz liczby tąpnięć n_t i liczby wstrząsów n_w określa prawdopodobieństwo wystąpienia tąpnięcia przy określonej liczbie i rzędzie energii wstrząsów, w rzeczywistości jednego jednoznacznie mierzalnego miernika stanu zagrożenia tąpnięciami. Opisać je można równaniem

$$\log \frac{n_t}{n_w} = -14,598 \cdot e^{-0,3352 \log E} \quad (2)$$

Wynika z niego, że prawdopodobieństwo wystąpienia tąpnięcia przy wstrząsie rzędu $5 \cdot 10^3 \text{ J}$ wynosi

$$P = \frac{n_t}{n_w} = 7,49 \cdot 10^{-5}$$

natomiast przy wstrząsie rzędu $5 \cdot 10^9 \text{ J}$ wynosi

$$P = \frac{n_t}{n_w} = 3,37 \cdot 10^{-1}$$

4. Tąpnięcia a ryzyko wypadków

Przez pojęcie ryzyka R rozumiemy iloczyn prawdopodobieństwa P wystąpienia niepożądanego zdarzenia powodowanego określonym zagrożeniem i strat S w związku z jego wystąpieniem, czyli

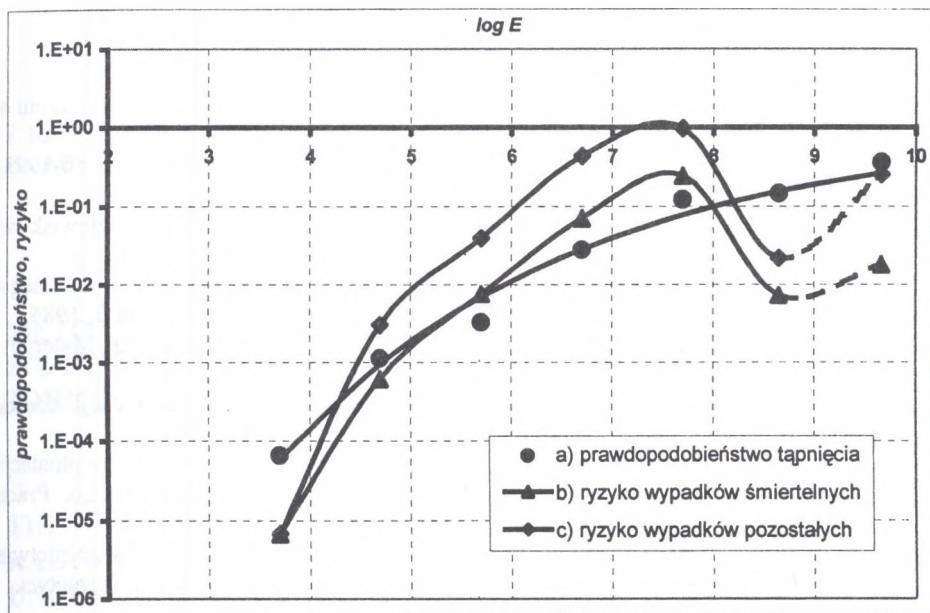
$$R = P S \quad (3)$$

Jako straty mogą być rozumiane wypadki określonej kategorii, straty materialne, np. zniszczenie lub uszkodzenie określonego odcinka wyrobiska, zniszczenie maszyn i urządzeń, przerwy w produkcji, czasowe bądź trwałe wyłączenie z wydobycia określonego fragmentu złoża itp. W miejscu tym przeanalizujemy wypadkowość powodowaną tąpnięciami, a zestawioną w tablicy 2 i sporządzonym na jej podstawie rysunku 5. Widzimy, że ryzyko zaistnienia wypadku śmiertelnego zwiększa się wraz z energią wstrząsu w przybliżeniu do wartości $E \sim 5 \cdot 10^7 \text{ J}$. Następnie zmniejsza się, by później znowu wzrosnąć. Ostatni punkt krzywej należy traktować jako mniej statystycznie wiarygodny, gdyż oparty na jednym przypadku tąpnięcia z ofiarami śmiertelnymi przy wstrząsie o energii powyżej 10^9 J .

Powyższe można wiązać z występowaniem wstrząsów lokalnych, generowanych aktualnie prowadzonymi robotami górniczymi i wstrząsów regionalnych, będących rezultatem całokształtu dotychczas wykonanych robót górniczych, w szczególności eksploatacyjnych. Granicę tę dla warunków kopalń węgla kamiennego wyznacza energia wstrząsów rzędu 10^7 J [3]. Tąpnięcie związane ze wstrząsami lokalnymi obejmują wyrobiska przyprzodkowe, w których zatrudnieni są górnicy. Natomiast tąpnięcia związane ze wstrząsami regionalnymi mogą występować w wyrobiskach (odcinkach wyrobisk) odległych od przodków, w których to miejscach nie ma stałych stanowisk pracy. Stąd liczba poszkodowanych pracowników nie musi być proporcjonalna do skali zniszczenia lub uszkodzenia wyrobisk.

Podobny przebieg - jak dla wypadków śmiertelnych - posiada krzywa opisująca ryzyko dla wypadków pozostałych (rys. 5). Pewien wzrost ryzyka wypadków pozostałych dla tąpnięć, którym towarzyszą najwyższe notowane w Górniośląskim Zagłębiu Węglowym energie wstrząsów rzędu 10^9 J , można tłumaczyć - poza urazami czysto fizycznymi - stresem spowodowanym skalą zjawiska. Nie bez znaczenia pozostaje również sporadyczność występowania wstrząsów o energiach rzędu $10^8 + 10^9 \text{ J}$ i tąpnięć z nimi związanych. Stąd też na rozrzut wyników wpływa niży zbiór danych statystycznych tych zdarzeń.

Przedstawione na rysunku 5 wartości ryzyka wypadków nie uwzględniają liczby osób ekspozowanych na to zagrożenie. Jedynie wykazują wypadkowość przy tąpnięciach. W odniesieniu do ogółu osób zatrudnionych w warunkach zagrożenia tąpnięciami wartości ryzyka mogą być inne od podanych.



Rys. 5. Prawdopodobieństwo tąpnięcia (a), ryzyko wypadków śmiertelnych (b) i wypadków pozostałych (c) w zależności od energii wstrząsu E

5. Zakończenie

Dyskusyjna pozostaje kryterialna wartość ryzyka. Dla zakładów przemysłowych na ogół przyjmuje się [7]:

$R = 10^{-6}$ - ryzyko akceptowalne dla wszystkich grup społecznych,

$R = 10^{-5}$ - ryzyko akceptowalne dla nowych zakładów przemysłowych,

$R = 10^{-4}$ - maksymalny poziom ryzyka akceptowalnego,

$R = 10^{-3}$ - ryzyko tolerowalne.

Górnictwo jest zawodem podwyższonego ryzyka. Utrzymanie go na poziomie określonym dla zakładów przemysłowych wydaje się być trudne do spełnienia. Decyzja o przyjęciu wartości kryterialnych ryzyka w górnictwie powinna należeć do załogi i przedsiębiorcy. Nie ulega jednak wątpliwości, że eksploatacja pewnych partii złoża, w których prognozowane ryzyko jest szczególnie wysokie - powinna być zaniechana.

LITERATURA

1. Gerlach Z.: Empiryczne modele przewidywania stanów zagrożenia tąpnięciami w oparciu o wyniki sejsmologii górniczej. Praca doktorska AGH, Kraków 1991.
2. Katalog tąpnięć zaistniałych w kopalniach węgla kamiennego. Roczniki 1980-1999. Główny Instytut Górnictwa, niepublikowane.
3. Kijko A., Drzęźła B., Mendecki A.: Dlaczego rozkłady ekstremalnych zjawisk w kopalniach mają rozkład bimodalny. Acta Montana nr 71, Praha 1985.
4. Konopko W.: Stan i przyczyny zagrożenia tąpnięciami w kopalniach węgla kamiennego Górnosląskiego Zagłębia Węglowego. Bezpieczeństwo Pracy w Górnictwie, nr 3, 1984.
5. Konopko W., Makówka J.: Ryzyko wypadków powodowanych tąpnięciami. Materiały konferencji „Eksploracja złoża na dużych głębokościach”. Wrocław 2000.
6. Makówka J.: Zagrożenie tąpnięciami jako kryterium zaniechania eksploatacji części pokładu węgla kamiennego. Praca doktorska, GIG, Katowice 1999.
7. Nyczporuk Z.: Kształtowanie bezpieczeństwa na przykładzie eksploatacji zmechanizowanych kompleksów ścianowych w kopalniach węgla kamiennego. Prace Naukowe GIG, nr 817, Katowice 1996.
8. Raport roczny o stanie podstawowych zagrożeń naturalnych i technicznych w górnictwie węgla kamiennego. Roczniki 1992-1999. Wydawnictwo Głównego Instytutu Górnictwa.

Recenzent: prof. dr hab. inż., dr h. c. Bernard Drzęźła

Abstract

Seismic activity generated by mining operation is one of indicators used in polish mining industry to estimate rockburst hazard. Annual statistic of coal production, seismic activity, rockburst and the relating incidents has been presented in the article. It has been noticed that both seismic energy and coal production decreased over 1980-99, but without any special correlation. However, incident hazard (mortal or the other) is maximal for rockbursts of the energy of the order of 10^7 J. The authors are of the opinion that it may be caused by faint interdependence of tremors of energy higher than 10^8 J and current operation, and by larger distance between the tremor and mine workings.