



Charakterystyka „tapaniowo-energetyczna” dla danych zarejestrowanych w GZW – aktualizacja do 2013 roku

Rockburst-energy characteristics for data registered in the GZW – update to 2013

Dr inż. Iwona Gołda*)

Treść: W artykule zaprezentowana została aktualna postać punktowa charakterystyki „tapaniowo-energetycznej”, wyznaczona na podstawie archiwalnych danych dotyczących wstrząsów i tąpnięć zarejestrowanych w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym (GZW) w latach 1999-2013. Punktowa charakterystyka „tapaniowo-energetyczna” w całej pracy interpretowana jest jako warunkowe, średnie prawdopodobieństwo tąpnięcia $P(T | E \geq E_1)$, gdzie warunek stanowi wystąpienie wstrząsu o energii E większej od pewnej przyjętej wartości energii E_1 , natomiast średnie, ponieważ jest to wartość średnia zmiennej losowej i podkreśla to symbol kreski nad tą zmienną. W pracy zaprezentowano charakterystyki dla okresów pięcioletnich oraz dziesięcioletnich, których graficzna postać przedstawia zmienną w czasie zależność pomiędzy liczbą wstrząsów a liczbą tąpnięć.

Abstract: This paper presents the current version of point rockburst-energy characteristics, defined on the basis of the archival tremors and rockburst data registered in the Upper Silesian Coal Basin (GZW) during 1999-2013. In this paper, point rockburst-energy characteristics are interpreted as the conditional, average probability of rockburst, where the occurrence with energy tremor E , larger than the assumed value of energy, is the condition, average because it is an average value of a random variable and it is highlighted with a line symbol under this variable. The paper presents rockburst-energy characteristics for periods of five and ten years, which present a time-changed relationship between the number of tremors and the number of rockburst in graphical form.

Słowa kluczowe:

wstrząs, tąpnięcie, prawdopodobieństwo

Key words:

tremor, rockburst, probability

1. Wprowadzenie

Tąpnięcia oraz wstrząsy górnicze stanowią nierozłączny element górnictwa i wpływają na powszechnie występujące zagrożenie sejsmiczne i tapaniami w podziemnych zakładach górniczych. Liczba wstrząsów oraz tąpnięć, ich energia czy lokalizacja, jak wiadomo, wynika m.in. ze wzrostu głębokości na jakiej prowadzone są prace, zaszczości eksploatacyjnych oraz warunków geologicznych i powierzchniowych powodujących tzw. eksploatację skrupowaną. W obszarze GZW głównymi rejonami wzmózonej aktywności sejsmicznej jest niecka bytomska, siodło główne, niecka kazimierzowska, niecka główna, niecka jejkowińska i sfałdowania Jastrzębia. Rejony te charakteryzują się głębokim zaleganiem pokładów węgla, które otoczone są dodatkowo kompleksami wytrzymałego piaskowca o różnorodnej tektonice [13]. Jak podaje Patyńska [11] w roku 2013 spośród 29 kopalń prowadzących wydobywanie na obszarze GZW aż 21 z nich eksploatowało pokłady zaliczane do zagrożonych tapaniami. Podkreślić należy, że 48,25% całkowitego wydobywania w GZW pochodziło właśnie z pokładów zagrożonych tapaniami, a w przypadku takich kopalń jak „Bobrek-Centrum”, „Pokój”, „Bielszowice” oraz

„Rydułtowy-Anna” całość wydobywania pochodziła z pokładów zagrożonych tapaniami. Temat związany z zagrożeniem sejsmicznym oraz tapaniami jest ciągle aktualny i wymagający analizy, zapewne prowadzącej do polepszenia stanu wiedzy w tym zakresie.

Na podstawie statystyki dotyczącej wstrząsów oraz tąpnięć zaprezentowanej w raporcie rocznym o stanie podstawowych zagrożeń naturalnych i technicznych w górnictwie węgla kamiennego [11] zauważyć można, że w roku 2013 – w porównaniu do lat wcześniejszych – spadła liczba tąpnięć, lecz jednocześnie zwiększyła się liczba wstrząsów, co powoduje, że relacja pomiędzy wstrząsem a tąpnięciem (zarówno w kontekście ilościowym, jak i energetycznym) uległa zmianie. Wiadomo jednocześnie, że wstrząs górniczy (m.in. jego „siła” w postaci energii) jest warunkiem niezbędnym, aby doszło do tąpnięcia [3], stąd też podczas analizy sejsmicznego zagrożenia tąpnięciem Z^{ST} lub też zagrożenia tąpnięciem Z^T istotną rolę odgrywa m.in. charakterystyka „tapaniowo-energetyczna”, która prezentuje zależność ilościowo-energetyczną pomiędzy zdarzeniami jakimi są wstrząsy górnicze a zdarzeniami jakimi są tąpnięcia. Istotność corocznej aktualizacji takiej zależności w oparciu o nowe dane wydaje się bezsporna i to właśnie jest celem artykułu.

*) Politechnika Śląska, Gliwice

2. Definicje oraz ich interpretacja

Przyjmuje się, że tąpnięcie jest zdarzeniem dychotomicznym, ponieważ wystąpi lub też nie. W literaturze światowej prawdopodobieństwo takich zdarzeń aproksymowane jest zazwyczaj za pomocą krzywej logistycznej [2], [10]. W całej pracy przyjmuje się, że warunkowe, prawdopodobieństwo tąpnięcia $P(T|E \geq E_1)$ wskutek wstrząsu o energii E większej od pewnej przyjętej wartości E_1 , zapisać można w postaci [15]

$$P(T|E \geq E_1) = (1 + \exp[-\alpha(\log E_1 - \beta)])^{-1} \quad (1)$$

gdzie: E_1 – warunek tąpnięcia w postaci wybranej wartości energii wstrząsu, np. tzw. energii zagrażającej; α i β – parametry wyznaczone empirycznie metodą regresji liniowej. Ponadto wykazać można, że wartości P z równania (1) zawierają się w przedziale $(0,1)$ ($\lim_{E_1 \rightarrow -\infty} P(T|E \geq E_1) = 0$; $\lim_{E_1 \rightarrow +\infty} P(T|E \geq E_1) = 1$) Równanie to może być też używane do aproksymacji prawdopodobieństwa. **Zależność opisana równaniem (1) nazywana jest w dalszej części pracy charakterystyką „tąpniowo-energetyczną”, a procedura (np. minimalnokwadratowej) estymacji parametrów (α i β) tej charakterystyki – kalibracją.** W literaturze (patrz np. [14], [16], [17]) spotkać się można także z interpretacją charakterystyki „tąpniowo-energetycznej” jako warunkowego prawdopodobieństwa tąpnięcia wskutek wstrząsu o energii E z pewnego przyjętego przedziału $E_1 \geq E \geq E_2$.

Świadomość dwójakiej możliwości interpretacyjnej jest szczególnie istotna w przypadku wykorzystania warunkowego prawdopodobieństwa tąpnięcia do oceny/prognozy sejsmicznego zagrożenia tąpnięciem Z^S , co (w przypadku przewyższeń tj. $E \geq E_1$) przedstawić można w sposób następujący

$$P(T, E \geq E_1) = P(E \geq E_1) \cdot P(T|E \geq E_1) = Z^S \cdot P(T|E \geq E_1) \quad (1)$$

gdzie: $P(T, E \geq E_1) \equiv Z^S$ – sejsmiczne zagrożenie tąpnięciem [8] definiowane jako prawdopodobieństwo tąpnięcia wynikające wyłącznie z zagrożenia sejsmicznego wstrząsem o energii $E \geq E_1$ i występujące pod warunkiem, że wstrząs ten wywoła tąpnięcie $P(T|E \geq E_1)$; $P(E \geq E_1) \equiv Z^S$ – zagrożenie sejsmiczne definiowane jako prawdopodobieństwo przewyższenia, w określonym czasie i przestrzeni, energii E_1 możliwe do estymacji dzięki wykorzystaniu rozkładu Pareto (lub jego logarytmicznej formy – rozkładu Gutenberga-Richtera) i przyjęciu założenia o poissonowskim charakterze emisji wstrząsów i ich odcinkowej stacjonarności (np. [7], [20], [21], [22]). Zapis równania (2) jest możliwy natomiast dzięki zastosowaniu podstawowych zasad rachunku prawdopodobieństwa, w szczególności pojęcia prawdopodobieństwa warunkowego oraz twierdzenia o iloczynie logicznym („konjunkcji”) dwóch zdarzeń (np. tąpnięcia i wstrząsu o energii $E \geq E_1$) – [1], [6]. Z twierdzenia tego wynika że, chcąc uzyskać ocenę Z^S , należy estymować iloczyn: prawdopodobieństwa wystąpienia energii $E \geq E_1$ (identyfikowanego w tej pracy z Z^S) i prawdopodobieństwa warunkowego $P(T|E \geq E_1)$, że dana „przestrzeń (klasa) prób” spowoduje tąpnięcie [4], [16], [18]. Równanie (2) zapisać można również w analogiczny sposób dla przypadku uwzględniającego estymację zagrożeń/prawdopodobieństw dla przedziału energii, jednakże w zapisach oraz interpretacji pamiętać należy o spójności wnioskowania, a mianowicie: jeśli zagrożenie sejsmiczne Z^S to prawdopodobieństwo przewyższenia energii $P(E \geq E_1)$, to prawdopodobieństwo warunkowe $P(T|E \geq E_1)$ dotyczyć musi tego samego zakresu (przewyższenia) energii. Natomiast jeśli zagrożenie sejsmiczne Z^S to prawdopodobieństwo wystąpienia energii

z przedziału $P(E_2 \geq E \geq E_1)$, to prawdopodobieństwo warunkowe $P(T|E_2 \geq E \geq E_1)$ dotyczyć musi tego samego przedziału energii. Powyższe warunkuje nie tylko interpretację, ale i graficzną postać charakterystyki tąpniowo-energetycznej. W pracy zaprezentowana została postać charakterystyki tąpniowo-energetycznej dla przewyższeń. Pamiętać należy także, że estymator (2) przedstawia tylko część geofizyczną ogólnego estymatora zagrożenia tąpnięciem Z^T , w którym uwzględnić można także inne czynniki kształtujące zagrożenie, takie jak głębokość eksploatacji H czy wytrzymałość skał na ściskanie R_C [16], [17], [19].

3. Kalibracja charakterystyki - ocena punktowa i probabilistyczna $P(T|E \geq E_1)$

Kalibrację charakterystyki „tąpniowo-energetycznej” otrzymujemy poprzez przekształcenie równania (1) do postaci

$$-\alpha(\log E_1 - \beta) = \ln \frac{1 - P(T|E \geq E_1)}{P(T|E \geq E_1)} \quad (3)$$

Aby zwiększyć przejrzystość zapisu zastosować można zapis skrócony, gdzie: $P(T|E \geq E_1) = P$ a $-\alpha(\log E_1 - \beta) = K$, co umożliwi przedstawienie równania (4) w następujący sposób

$$K = \ln[(1 - P) / P] \quad (4)$$

Równanie (4) w statystyce nazywane bywa przekształceniem lub też transformacją logistyczną (logitową), a w formie funkcji liniowej zapisane może być w postaci

$$K = -a \log E^1 + c \quad (5)$$

gdzie: $c = \alpha \beta$.

Do kalibracji charakterystyki „tąpniowo-energetycznej” konieczna jest statystyka związana z liczebnością wstrząsów oraz tąpnięć w poszczególnych klasach energetycznych, która prezentowana jest systematycznie w Raportach rocznych publikowanych przez Główny Instytut Górnictwa [11]. Prawdopodobieństwo P aproksymuje się ilorazem liczby tąpnięć N^T i liczby wstrząsów N^W na podstawie danych empirycznych, a następnie układając j równań liniowych z dwoma niewiadomymi (α i c) na podstawie (5), gdzie j to przyjęta liczba przedziałów energii („przestrzeni prób”) a $\log E_i$ oznacza dolną granicę danego przedziału. Tak powstały układ równań rozwiązany może być za pomocą układu macierzowego $AY=K$

$$Y = (A^T A)^{-1} A^T K \quad (6)$$

gdzie: A^T – oznacza macierz transponowaną, $(A^T A)^{-1}$ – macierz odwrotną iloczynu. Poniżej, w celu zilustrowania procedury kalibracji i graficznej interpretacji charakterystyki¹, zaprezentowano obliczenia wykonane na podstawie danych dotyczących wstrząsów i tąpnięć zarejestrowanych w GZW w latach 2004-2013 [11].

Na podstawie statystyki wstrząsów N^W i tąpnięć N^T z lat 2004-2013 w GZW, w oparciu o (4) sporządzono tabelę nr 1

¹ Zaprezentowany sposób wyznaczania parametrów charakterystyki stosować można także dla innych parametrów opisanych w Metodzie Rozeznania Górniczego wchodzącej w skład Kompleksowej Metody Oceny Stanu Zagrożenia Tąpnięciami.

Tablica 1. Uproszczona statystyka wstrząsów i tąpnięć w GZW z lat 2004-2013 obejmująca zdarzenia w przyjętym przedziale energii oraz logarytmy górnych granic tych przedziałów
Table 1. Simplified tremors and rockburst statistics in the GZW during 2004-2013, including events in a defined energy range and the logarithms of the top limits of these ranges

E, J		$\geq 1 \cdot 10^5$	$\geq 1 \cdot 10^6$	$\geq 1 \cdot 10^7$	$\geq 1 \cdot 10^8$	$\geq 1 \cdot 10^9$
log E_i		5	6	7	8	9
2004-2013	N^W	10913	1750	175	15	2
	N^T	27	21	15	2	0
	$K_i = \ln \frac{1 - (N^T / N^W)}{(N^T / N^W)}$	5,9994	4,4108	2,3671	1,8718	-

W oparciu o uzyskane wartości oraz (5), ułożony został układ L równań z dwoma niewiadomymi, gdzie L – jest liczbą przedziałów energii (tutaj $L=4$)²:

$$\begin{cases} -5\alpha + c = 5,9994 \\ -6\alpha + c = 4,4108 \\ -7\alpha + c = 2,3671 \\ -8\alpha + c = 1,8718 \end{cases} \quad (7)$$

których minimalnokwadratowe rozwiązanie wynosi $\alpha=1,4426$ oraz $\beta=9,0386$ (ponieważ $c=\alpha\beta$ to $c=13,0395$). Sprawdzeniem obliczeń jest wyznaczenie sumy odchyłek ε_i

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon_i = \sum [K_i - (c - \alpha \log E_i)] \approx 0 \quad (8)$$

która powinna wynosić w przybliżeniu 0. Oprócz parametrów α i β w wyniku minimalnokwadratowej estymacji otrzymuje się także odchylenie standardowe zlinearyzowanego rozwiązania (tzn. odchylenie standardowe błędów dopasowania danych empirycznych do równania $K = -\alpha(\log E_i - \beta)$ w postaci

$$\sigma_K = \sqrt{L^{-1} \cdot \sum \varepsilon_i^2} = 0,3534 \quad (9)$$

gdzie L jest liczbą „obserwacji” (tzn. przedziałów energii) i $\sigma_K^2 = L^{-1} \sum \varepsilon_i^2$ to (przybliżona) wariancja błędów dopasowania do linii regresji (5). Zatem dla lat 2004-2013:

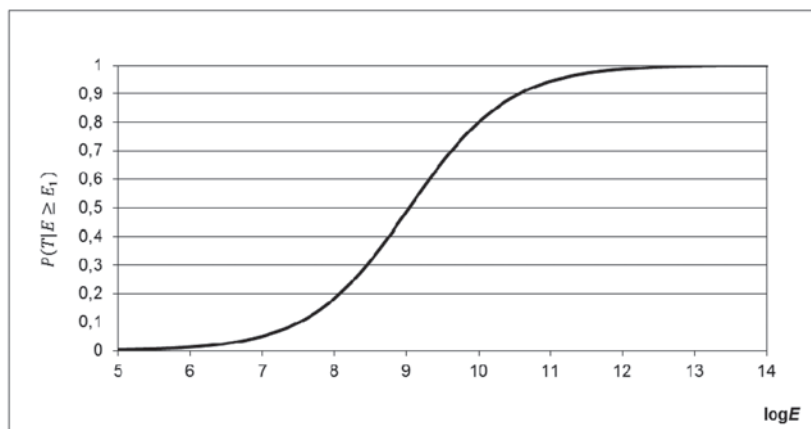
² Pola zaszarzone w tab.1 są wynikiem braku tąpnięć związanych z energią $E \geq 1 \cdot 10^9$ [J], co uniemożliwia dalsze obliczenia. W rozdz. 4, tab. 2a oraz 3a zastosowano analogiczne oznaczenia.

$$P(T | E \geq E_i) = \frac{1}{1 + \exp[-1,4426(\log E_i - 9,0386)]} \quad (10)$$

Na rys. 1 pokazano graficzną interpretację charakterystyki tąpniowo-energetycznej.

Zaprezentowaną kalibrację charakterystyki wykonać można dla dowolnego okresu czasu, przygotowując odpowiadającą mu statystykę wstrząsów i tąpnięć. Należy jednak zauważyć, że w zaprezentowanym przykładzie, jak i zazwyczaj w praktyce, estymacja parametrów α i β oparta jest – ze względu na małą liczbę tąpnięć – na archiwach pochodzących z dużych obszarów (GZW) oraz z długich okresów czasu. Wartości te (α i β) mają więc – jak również zależność (10) powstała po ich podstawieniu – charakter „globalny” (tzn. dotyczą całego podanego okresu czasu i wszystkich kopalń, z których dane posłużyły do ich wyznaczenia). Z oczywistych względów próba obliczenia α i β dla krótszych okresów czasu, lub też mniejszych obszarów, jest nieuzasadniona lub nawet niemożliwa. Ponieważ $P(T | E \geq E_i)$ uzyskane zostało na drodze estymacji w oparciu o dane, które częstokroć obarczone są niepewnością, to estymatę uzyskaną z równania (10) należy traktować jako również obarczoną niepewnością.

Uwzględnienie niepewności oceny jest rozsądnym podejściem do zagadnienia estymat, czego potwierdzeniem jest wydany w 1995 roku Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement [9], który w 1999 roku przetłumaczony został także na język polski jako przewodnik omawiający wyrażanie niepewności pomiaru [5]. Dokument ten traktowany jest jako Międzynarodowa Norma Oceny Niepewności Pomiaru i powszechnie uznawany na całym świecie. Wg GUM niepewność oceny nie jest błędem oceny, lecz wiąże się z jej rozkładem prawdopodobieństwa, czyli z rozproszeniem wartości zmien-



Rys. 1. Charakterystyka tąpniowo-energetyczna wyznaczona dla danych dotyczących wstrząsów i tąpnięć zarejestrowanych w GZW w latach 2004-2013

Fig. 1. Rockburst-energy characteristics defined for the tremors and rockburst data registered in the GZW during 2004-2013

nej losowej wokół jej wartości średniej i wbrew negatywnym odczuciom jako błąd nie powinna być traktowana. Ponadto „wynik pomiaru tylko wtedy jest kompletny, gdy zawiera zarówno wartość wielkości mierzonej, jak i niepewność pomiaru, związaną z tą wartością” [5]. Stąd też, warunkowe prawdopodobieństwo tąpnięcia $P(T | E \geq E_1)$, dla ustalonej wartości E_1 , również należy traktować jako zmienną losową o określonym rozproszeniu, a wartość uzyskaną z (10) – dla różnych E_1 – jako wartość średnią $P(T | E \geq E_1)$ – kreska nad zmienną podkreśla, że jest to wartość średnia zmiennej losowej. Oceny uwzględniające niepewność utożsamiane są przez autorkę z ocenami probabilistycznymi, natomiast oceny nieuwzględniające niepewności – ocenami punktowymi (równanie (10)).

Niepewność oceny $\overline{P(T | E \geq E_1)}$ – czyli charakterystyki – w postaci σ_K opisanej równaniem (9), związana jest m.in. z ograniczoną liczbą tąpnięć w rozpatrywanym okresie czasu (co przekłada się na zadanie regresji liniowej), jak również z dokładnością rejestracji energii wstrząsów. Jeśli energie wstrząsów (stanowiące bazę danych w metodzie) wyznaczone są niedokładnie, podział ich na podzbiory o określonych granicach (energetycznych) jest także niedokładny, a niedokładność ta propaguje do zadania regresji, czyli oceny parametrów charakterystyki.

4. Charakterystyka tapaniowo-energetyczna na przestrzeni lat

Jak już wcześniej wspomniano, charakterystyka tapaniowo-energetyczna wykorzystuje zależności ilościowo-energetyczne pomiędzy zdarzeniami jakimi są wstrząsy oraz tąpnięcia. Interesujące zatem wydaje się być, jak zależność ta zmienia się w czasie. W związku z powyższym, analogicznie jak w rozdziale 3 (części dotyczącej kalibracji), w oparciu o Raporty Roczne [11], [12] w tab. 2 przedstawiono uproszczoną statystykę wstrząsów i tąpnięć dla kolejno następujących po sobie dekad, rozpoczynając od okresu 1999-2008.

Na podstawie danych zawartych w tab. 2 wykonano kalibracje charakterystyk dla poszczególnych okresów czasu, uzyskując parametry α i β oraz σ_K , które zestawiono w tab. 3.

Graficzna interpretacja charakterystyk dla kolejno następujących po sobie dekad zaprezentowana została na rys. 2.

Analogicznie, jak i wcześniej, na podstawie danych zawartych w tab. 4 wykonano kalibracje charakterystyk dla poszczególnych okresów czasu, uzyskując parametry α i β oraz σ_K , które zestawiono w tab. 5.

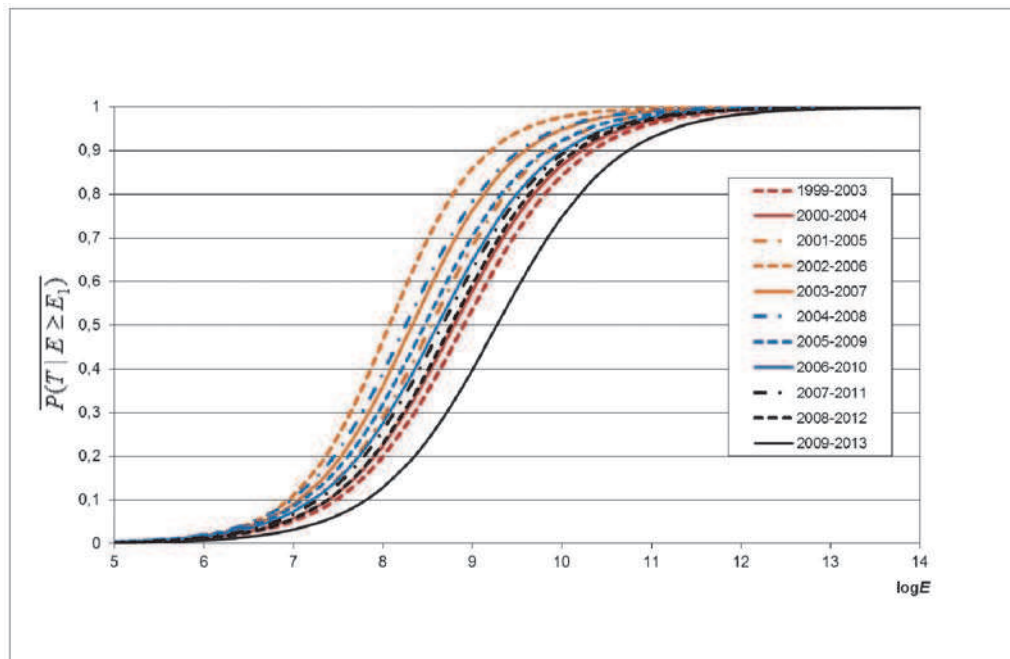
Tablica 2. Uproszczona statystyka wstrząsów i tąpnięć w GZW dla wybranych dekad, obejmująca zdarzenia w przyjętym przedziale energii E oraz logarytmy górnych granic tych przedziałów

Table 2. Simplified tremors and rockburst statistics in the GZW for selected decades, including events in a defined energy range and the logarithms of the top limits of these ranges

E, J		$\geq 1 \cdot 10^5$	$\geq 1 \cdot 10^6$	$\geq 1 \cdot 10^7$	$\geq 1 \cdot 10^8$	$\geq 1 \cdot 10^9$
$\log E_i$		5	6	7	8	9
1999-2008	N^W	11660	1782	177	9	1
	N^T	34	25	17	2	0
	$K_i = \ln \frac{1 - (N^T / N^W)}{(N^T / N^W)}$	5,8346	4,2525	2,2420	1,2528	-
2000-2009	N^W	11297	1694	182	10	1
	N^T	33	24	17	2	0
	$K_i = \ln \frac{1 - (N^T / N^W)}{(N^T / N^W)}$	5,8329	4,2425	2,2727	1,3863	-
2001-2010	N^W	11415	1654	177	11	2
	N^T	33	24	16	2	0
	$K_i = \ln \frac{1 - (N^T / N^W)}{(N^T / N^W)}$	5,8433	4,2183	2,3088	1,5041	-
2002-2011	N^W	11312	1612	180	14	2
	N^T	33	25	15	2	0
	$K_i = \ln \frac{1 - (N^T / N^W)}{(N^T / N^W)}$	5,8342	4,1507	2,3979	1,7918	-
2003-2012	N^W	11010	1650	179	16	2
	N^T	30	24	15	2	0
	$K_i = \ln \frac{1 - (N^T / N^W)}{(N^T / N^W)}$	5,9026	4,2158	2,3918	1,9459	-
2004-2013	N^W	10913	1750	175	15	2
	N^T	27	21	15	2	0
	$K_i = \ln \frac{1 - (N^T / N^W)}{(N^T / N^W)}$	5,9994	4,4108	2,3671	1,8718	-

Tablica 3. Wartości parametrów charakterystyki tąpniowo-energetycznej $P(T | E \geq E_1)$ wraz z jej niepewnością standardową σ_K w zależności od dekad, dla których były wyznaczane
Table 3. Values of rockburst-energy characteristics parameters $P(T | E \geq E_1)$ and standard uncertainty σ_K depending on decades when they were determined

Przedział czasu, lata	α	β	σ_K
1999-2008	1,5756	8,6550	0,2196
2000-2009	1,5309	8,7428	0,2402
2001-2010	1,4927	8,8237	0,2572
2002-2011	1,3880	9,0530	0,3017
2003-2012	1,3694	9,1391	0,3535
2004-2013	1,4426	9,0386	0,3534



Rys. 2. Charakterystyka tąpniowo-energetyczna (warunkowe średnie – pod warunkiem wystąpienia wstrząsu o energii $E \geq E_1$ – prawdopodobieństwo tąpnięcia $P(T | E \geq E_1)$) dla kopalń GZW w wybranych dekadach

Fig. 2. Rockburst-energy characteristics (conditional average – under the condition of the tremor's appearance with the energy $E \geq E_1$ – probability of rockburst $P(T | E \geq E_1)$) for mines in the GZW in selected decades

Graficzna interpretacja charakterystyk dla kolejno następujących po sobie okresów pięcioletnich zaprezentowano na rys. 3.

Na podstawie zaprezentowanych statystyk – tab. 2 oraz 4 – widać wyraźnie, że proporcje pomiędzy liczbą tąpnięć a liczbą wstrząsów na przestrzeni lat ulegają zmianie.

Dla przeanalizowanych okresów dziesięcioletnich, liczba tąpnięć w stosunku do liczby wstrząsów w trzech z czterech przedziałów energetycznych okazała się największa w latach 1999-2008 – patrz tab. 2, czego skutkiem jest największe średnie, warunkowe prawdopodobieństwo tąpnięcia $P(T | E \geq E_1)$ – patrz rys. 2. Najmniejsze $P(T | E \geq E_1)$ dotyczy lat 2003-2012, jednakże jest ono porównywalne z tym, które wyznaczono dla lat 2002-2011 oraz aktualnej postaci dla lat 2004-2013, dla której parametry wynoszą odpowiednio $\alpha=1,4426$ i $\beta=9,0386$, a niepewność standardowa $\sigma_K=0,3534$.

Analizując następujące po sobie okresy pięcioletnie, zauważyć można, że w zaprezentowanych przypadkach, liczba tąpnięć w stosunku do liczby wstrząsów, w trzech pierwszych klasach energetycznych jest największa w latach 2004-2008,

natomiast w czwartej klasie energetycznej (tj. $E \geq 1 \cdot 10^8$ J) w latach 2002-2006. Stąd też w latach 2004-2008 oraz 2002-2006, średnie prawdopodobieństwo tąpnięcia $P(T | E \geq E_1)$ pod warunkiem wystąpienia wstrząsu o energii większej od pewnej przyjętej wartości jest większe niż w pozostałych okresach czasu – patrz rys. 3. Liczba tąpnięć w stosunku do liczby wstrząsów jest natomiast najmniejsza dla aktualnej postaci charakterystyki tąpniowo-energetycznej wyznaczonej dla lat 2009-2013, co również wyraźnie widać na rys. 3. Ponadto parametry charakterystyki tąpniowo-energetycznej dla lat 2009-2013 wynoszą odpowiednio $\alpha=1,50267$ i $\beta=9,2734$, a niepewność standardowa $\sigma_K=0,0212$.

Zawarte w tab. 3 i 5 wartości parametrów charakterystyki tąpniowo-energetycznej są różne dla różnych okresów czasu, zaleca się zatem aktualizację charakterystyki tąpniowo-energetycznej (jej kalibrację) w celu uzyskania aktualnej oceny $P(T | E \geq E_1)$ wraz z wartością jej niepewności standardowej σ_K , która może być różna, czego potwierdzeniem są zaprezentowane przykłady, w których maksymalne i minimalne wartości niepewności standardowej σ_K dla przeanalizowa-

Tablica 4. Uproszczona statystyka wstrząsów i tąpnięć w GZW dla wybranych okresów pięcioletnich, obejmująca zdarzenia w przyjętym przedziale energii oraz logarytmy górnych granic tych przedziałów
Table 4. Simplified tremors and rockburst statistics in the GZW for selected periods of five years, including events in a defined energy range and the logarithms of the top limits of these ranges

E, J		$\geq 1 \cdot 10^5$	$\geq 1 \cdot 10^6$	$\geq 1 \cdot 10^7$	$\geq 1 \cdot 10^8$	$\geq 1 \cdot 10$
log E_i		5	6	7	8	9
1999-2003	NW	6208	1026	95	3	0
	NT	16	11	5	0	0
	$K_i = \ln \frac{1-(N^T / N^W)}{(N^T / N^W)}$	5,9584	4,5247	2,8904	-	-
2000-2004	NW	6046	960	100	2	0
	NT	17	11	6	0	0
	$K_i = \ln \frac{1-(N^T / N^W)}{(N^T / N^W)}$	5,8711	4,4575	2,7515	-	-
2001-2005	NW	6409	944	96	2	0
	NT	18	13	7	0	0
	$K_i = \ln \frac{1-(N^T / N^W)}{(N^T / N^W)}$	5,8723	4,2713	2,5427	-	-
2002-2006	NW	6444	930	106	4	0
	NT	18	15	10	2	0
	$K_i = \ln \frac{1-(N^T / N^W)}{(N^T / N^W)}$	5,8777	4,1109	2,2618	0	-
2003-2007	NW	6059	847	95	6	1
	NT	17	15	10	2	0
	$K_i = \ln \frac{1-(N^T / N^W)}{(N^T / N^W)}$	5,8733	4,0158	2,1401	0,6931	-
2004-2008	NW	5452	756	82	6	1
	NT	18	14	12	2	0
	$K_i = \ln \frac{1-(N^T / N^W)}{(N^T / N^W)}$	5,7101	3,9703	1,7636	0,6931	-
2005-2009	NW	5251	734	82	8	1
	NT	16	13	11	2	0
	$K_i = \ln \frac{1-(N^T / N^W)}{(N^T / N^W)}$	5,7905	4,0157	1,8648	1,0986	-
2006-2010	NW	5006	710	81	9	2
	NT	15	11	9	2	0
	$K_i = \ln \frac{1-(N^T / N^W)}{(N^T / N^W)}$	5,8073	4,1518	2,0794	1,2528	-
2007-2011	NW	4868	682	74	10	2
	NT	15	10	5	0	0
	$K_i = \ln \frac{1-(N^T / N^W)}{(N^T / N^W)}$	5,7793	4,2077	2,6247	-	-
2008-2012	NW	4951	803	84	10	1
	NT	13	9	5	0	0
	$K_i = \ln \frac{1-(N^T / N^W)}{(N^T / N^W)}$	5,9398	4,4799	2,7600	-	-
2009-2013	NW	5461	994	93	9	1
	NT	9	7	3	0	0
	$K_i = \ln \frac{1-(N^T / N^W)}{(N^T / N^W)}$	6,4065	4,9488	3,4012	-	-

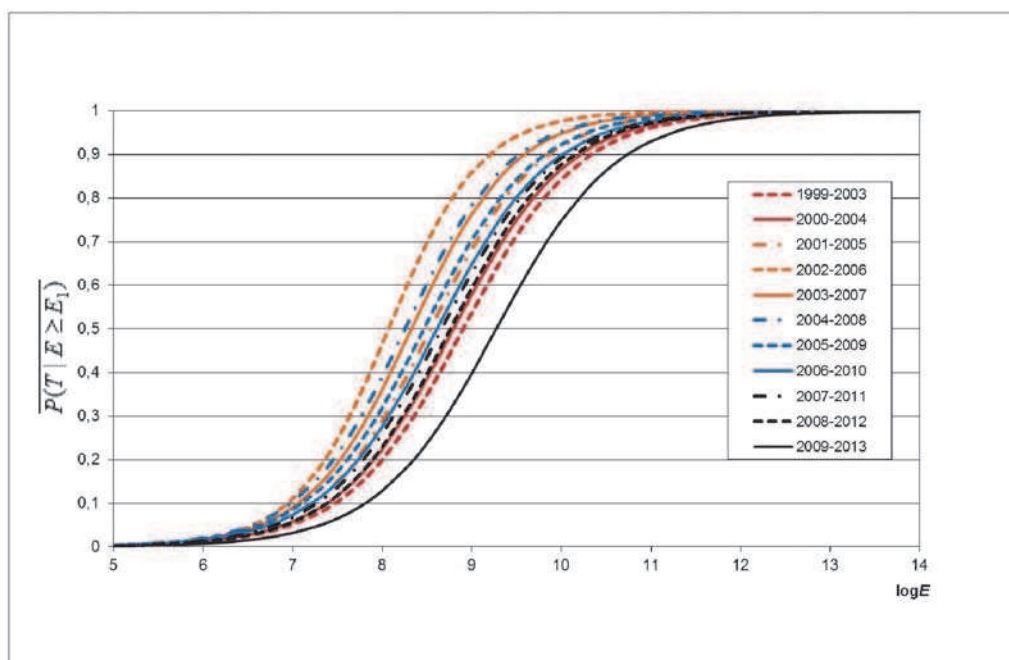
nych okresów pięcioletnich wynoszą: $\sigma_{K_{\min}}=0,0027$ dla lat 2007-2011 i $\sigma_{K_{\max}}=0,3199$ dla lat 2005-2009, natomiast dla przeanalizowanych dekad wynoszą: $\sigma_{K_{\min}}=0,2196$ dla lat 1999-2008 i $\sigma_{K_{\max}}=0,3535$ dla lat 2003-2012. Zauważyć można, że niepewność standardowa σ_K charakterystyk kalibrowanych dla okresów pięcioletnich jest zazwyczaj zdecydowanie mniejsza

niz dla okresów dziesięcioletnich, jednakże wydaje się, że tak znaczna różnica wynika z liczby przyjętych/możliwych przedziałów energetycznych, a co za tym idzie – liczby równań w zadaniu regresji minimalnokwadratowej związanej z kalibracją charakterystyki.

Tablica 5. Wartości parametrów charakterystyki tąpniowo-energetycznej $P(T | E \geq E_1)$ wraz z jej niepewnością standardową σ_k w zależności od okresów pięcioletnich dla których były wyznaczone

Table 5. Value of rockburst-energy characteristics parameters $P(T | E \geq E_1)$ and standard uncertainty σ_k depending on periods of five years when they were determined

Przedział czasu, lata	α	β	σ_k
1999-2003	1,5340	8,9060	0,0473
2000-2004	1,5598	8,7953	0,0689
2001-2005	1,6648	8,5401	0,0301
2002-2006	1,9482	8,0720	0,1291
2003-2007	1,7416	8,3262	0,1142
2004-2008	1,7257	8,2582	0,2452
2005-2009	1,6227	8,4674	0,3199
2006-2010	1,5736	8,6116	0,2784
2007-2011	1,5773	8,6652	0,0027
2008-2012	1,5899	8,7632	0,0613
2009-2013	1,50267	9,2734	0,0212



Rys. 3. Charakterystyka tąpniowo-energetyczna (warunkowe średnie – pod warunkiem wystąpienia wstrząsu o energii $E \geq E_1$ – prawdopodobieństwo tąpnięcia $P(T | E \geq E_1)$) dla kopalń GZW w wybranych okresach pięcioletnich

Fig. 3. Rockburst-energy characteristics (conditional average – under the condition of the tremor's appearance with the energy $E \geq E_1$ – probability of rockburst $P(T | E \geq E_1)$) for mines in the GZW in selected periods of five years

5. Podsumowanie

Charakterystyki tąpniowo-energetyczne przedstawione w pracy służą zaprezentowaniu zmiennej w czasie zależności pomiędzy liczbą wstrząsów a liczbą tąpnięć w analizowanych okresach czasu. Można zauważyć, że dla okresów dziesięcioletnich zmiany charakterystyki w czasie są nieznaczne. W przypadku charakterystyk wyznaczanych dla okresów pięcioletnich zmiany te są bardziej istotne i wynikają z różnych ram czasowych (a co za tym idzie różnych danych). Pamiętać należy, że charakterystyka tąpniowo-energetyczna uśrednia wpływ energii po obszarze i okresie czasu, dla którego jej parametry (α , β) estymowano. Jest oczywiste, że charakterystyka ta powinna być dostosowana do warunków lokalnych (np. jednej kopalni i najbliższego okresu czasu),

lecz ograniczeniem jest mała liczba tąpnięć. Stosowanie jednak zbyt długich okresów czasu, również może zaburzać aktualność charakterystyki, stąd też podkreślenia wymaga fakt konieczności corocznej aktualizacji tej charakterystyki i rozsądnego dobierania okresów czasu, dla których ma być wyznaczana.

1. Ocena punktowa charakterystyki tąpniowo-energetycznej $P(T | E \geq E_1)$ to średnie prawdopodobieństwo tąpnięcia pod warunkiem wystąpienia wstrząsu o energii $E \geq E_1$.
2. Aktualny stan górotworu w obrębie GZW opisuje charakterystyka z parametrami $\alpha=1,50267$, $\beta=9,2734$ i $\sigma_k=0,0212$ wyznaczonymi na podstawie danych z lat 2009-2013 i to ona jest rekomendowana do użycia przy analizie zagadnień związanych z zagrożeniem tąpnięciami, jak również w przypadku prognozy sejs-

- smicznego zagrożenia tąpnięciem Z^{ST} po 2013 roku. Pod uwagę może być również brana charakterystyka z parametrami $\alpha=1,4426$, $\beta=9,0386$ i $\sigma_k=0,3534$ wyznaczonymi na podstawie danych z lat 2004-2013, jednakże wydaje się być ona mniej aktualna, niż ta wyznaczona dla okresu pięcioletniego i jest niezalecana do prognozy Z^{ST} po 2013 roku.
3. Zaprezentowaną kalibrację charakterystyki wykonać można również dla innych parametrów, takich jak głębokość prowadzonej eksploatacji czy wytrzymałość skał na ściskanie, dzięki czemu otrzymać można funkcję prawdopodobieństwa tąpnięcia pod warunkiem wystąpienia określonych wartości wymienionych parametrów, czyli charakterystykę tapaniowo-głębokościową lub tapaniowo-wytrzymałościową. Konieczne do tego celu jest jednak zgromadzenie dostatecznie dużej i szczegółowej bazy danych, dotyczącej występujących wstrząsów na określonych głębokościach czy w skałach o określonej wytrzymałości. Ciekawym zagadnieniem mogłoby okazać się również porównanie zaprezentowanych charakterystyk dla innych obszarów świata, gdzie prowadzona jest podziemna działalność górnicza.
- ### Literatura
1. Benjamin J.R., Cornell C.A.: Rachunek prawdopodobieństwa, statystyka matematyczna i teoria decyzji dla inżynierów. Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa 1977.
 2. Cox D.R.: The Analysis of Binary Data. London, Methuen, 1970.
 3. Dubiński J.: Związki przyczynowe wstrząsów i tapani. „Przeгляд Górnicy” 1994, Nr 2.
 4. Dubiński J., Konopko W.: Tapania: ocena, prognoza, zwalczanie. Wyd. GIG, Katowice 2000.
 5. EA-4/02 Wyrażanie niepewności pomiaru przy wzorcowaniu. Zakład Metrologii Ogólnej Głównego Urzędu Miar, ISBN 83-906546-2-8, 1999.
 6. Fisz M.: Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna. Wydanie czwarte, Wyd. PWN, Warszawa 1969.
 7. Gibowicz S.J., Kijko A.: An Introduction to Mining Seismology. Academic Press, New York, 1994.
 8. Golda I.: Ilościowa ocena sejsmicznego zagrożenia tąpnięciem wraz z analizą jej niepewności. Rozprawa doktorska, Gliwice 2013.
 9. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. ISO, Switzerland 1995.
 10. Hosmer D.W., Lemeshow S.: Applied Logistic Regression. New York, J.Wiley, 1989.
 11. Kabiesz J.(red.): Raport roczny o stanie podstawowych zagrożeń naturalnych i technicznych w górnictwie węgla kamiennego. Wyd. GIG, Katowice 2014.
 12. Konopko W.(red.): Raport roczny o stanie podstawowych zagrożeń naturalnych i technicznych w górnictwie węgla kamiennego. Wyd. GIG, Katowice 2009.
 13. Konopko W.: Warunki bezpiecznej eksploatacji pokładów węgla zagrożonych metanem, tapaniami i pożarami endogenicznymi. Wyd. GIG, Katowice 2010.
 14. Kornowski J.: Prosta, formalna metoda łącznej oceny zagrożenia tąpnięciem, na podstawie informacji geofizycznej i Metody Rozeznania Górniczego. „Górnictwo i Środowisko” 2010, Nr 2.
 15. Kornowski J., Kurzeja J.: Krótkookresowa prognoza indukowanego zagrożenia sejsmicznego w górnictwie. Prace Naukowe GIG, „Górnictwo i Środowisko” 2005 Nr 1.
 16. Kornowski J., Kurzeja J.: Krótkookresowe, przybliżone prawdopodobieństwo tąpnięcia na podstawie prognozowanego rozkładu energii sejsmicznej. „Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa”, 2007 Nr 9.
 17. Kornowski J., Golda I., Tarski Ł.: Ilościowa ocena zagrożenia wg „Metody Kompleksowej”. Część I: definicje i pojęcia. „Górnictwo i Środowisko” 2011, Nr 4.
 18. Kornowski J., Kurzeja J.: Prediction of rockburst probability given seismic energy and factors defined by Expert Method of Hazard Evaluation (MRG). Acta Geophysica, PAN, vol. 60, no. 2, pp. 472–486, Warszawa 2012.
 19. Kurzeja J., Kornowski J.: The basic assumptions of the quantitative version of the Comprehensive Method of Rockburst Hazard Evaluation. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, Vol. 29, Issue 2, pp. 193–204, Kraków 2013.
 20. Lasocki S.: Predykcja silnych wstrząsów górniczych. Zeszyty naukowe AGH seria: „Geofizyka Stosowana” 1990, z. 7.
 21. Lasocki S.: Predykcja zagrożenia sejsmicznego. Rozdz. 7.12, w: Drzeźła B., Dubiński J., Fajkiewicz Z., Goszcz A., Marcak H., Pilecki Z., Zuberek W.: Poradnik Geofizyka Górniczego, T.2, Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej, Wyd. CPPGSMiE PAN, Kraków 1995.
 22. Marcak H., Zuberek W.M.: Geofizyka górnicza. Śląskie Wyd. Techniczne, Katowice 1994.