

Józef DUBIŃSKI
Główny Instytut Górnictwa, Katowice

ZINTEGROWANY WSKAŹNIK SEJSMICZNY - MOŻLIWOŚĆ POPRAWY ROZPOZNANIA ZAGROŻENIA TĄPANIAMI W KOPALNIACH WĘGLA KAMIENNEGO

Streszczenie. Przedstawiono rozwiązanie z zakresu sejsmicznej metody rozpoznania stanu geomechanicznej struktury ośrodka skalnego zagrożonego wstrząsami i tąpnięciami, które polega na wyznaczaniu wartości zintegrowanego wskaźnika sejsmicznego Z . Uwzględnia on dwa czynniki, które charakteryzują stan naprężeń w badanym pokładzie węgla oraz stan niestabilności zewnętrznej, którą wywołuje zaburzenie struktury wstrząsogennych skał stropowych. Wykazano, że rozpoznanie sejsmiczne oparte na tym wskaźniku jest bardziej efektywne.

THE INTEGRATED SEISMIC INDEX – A POSSIBLE IMPROVEMENT IN RECOGNITION THE ROCKBURST HAZARD IN HARD COAL MINES

Summary. A solution procedure for the determination of the integrated seismic index value Z from the seismic method for recognition of the geomechanical state of rock medium structure is presented. The integrated seismic index takes into account two factors that characterize the stress state of a studied coal bed and the external instability state produced by the seismogenic roof strata structure disturbances. It has been shown that the seismic reconnaissance based on this index is more effective.

1. Wprowadzenie

Metoda sejsmicznych pomiarów dołowych i związane z nią podstawowe techniki profilowania i prześwietlania sejsmicznego znalazły szerokie zastosowanie w polskim górnictwie, szczególnie w kopalniach węgla kamiennego [1]. Wydaje się jednak, że rozwój metodologiczny w zakresie technik sejsmicznych zatrzymał się w miejscu i praktycznie w

latach 90. nie pojawiły się żadne istotne rozwiązania, które zwiększałyby efektywność sejsmicznego rozpoznania geomechanicznej struktury górotworu.

Stąd podjęte zostały w ostatnich latach działania i prace, których celem jest przede wszystkim lepsze wykorzystanie informacji o stanie fizycznym górotworu, zawartej w wynikach dołowych pomiarów sejsmicznych.

Jednym z rozwiązań w tym zakresie jest opracowanie tzw. zintegrowanego wskaźnika sejsmicznego, który, jak to zostanie przedstawione w artykule, zapewnia lepszą charakterystykę stanu zagrożenia sejsmicznego i tapaniowego w badanym górotworze.

2. Aktualny stan rozwoju metody sejsmicznej w górnictwie

Lata 70. i 80. to okres intensywnych prac badawczych i przede wszystkim licznych prac pomiarowych w kopalniach. Pozwoliły one na rozwój sejsmicznej metody rozpoznania górotworu, szczególnie pokładów węgla, głównie w aspekcie jego struktury geomechanicznej decydującej o występowaniu zjawisk geodynamicznych (wstrząsy, tapania, wyrzuty skalno-gazowe) [3]. Rozwinięto w tym czasie różne techniki pomiarów dołowych, odpowiednie metody przetwarzania rejestracji pomiarowych, interpretacji zarówno sejsmicznej, jak i geomechanicznej. Szczególnie istotna była interpretacja geomechaniczna, zadaniem której jest transformacja wyników sejsmicznych (np. rozkładu prędkości rozchodzenia się fal sejsmicznych) na wielkości geomechaniczne akceptowane przez odbiorców tych pomiarów (geomechanicy, górnicy). Transformacja ta, mająca początkowo charakter wyłącznie jakościowy, w miarę uzyskiwania nowych wyników mogła, w przypadku niektórych parametrów sejsmicznych, uzyskać formę zależności ilościowych [2]. Przykładowo, na podstawie parametru anomalii prędkości rozchodzenia się fali sejsmicznej podłużnej w pokładzie węgla opracowano oryginalną procedurę wyznaczania bezwzględnych i względnych przyrostów pionowej składowej naprężenia, określania stanu zagrożenia tapaniami, stopień odprężenia pokładu i wiele innych [4].

Aktualnie podstawowy zakres zastosowania metody sejsmicznej w problematyce geomechanicznej obejmuje:

- wyznaczanie stref koncentracji naprężeń oraz określanie ich parametrów geometrycznych i intensywności oddziaływania, związanych z różnymi sytuacjami górnictwymi (krawędzie zatrzymanej eksploatacji, resztki, zroby, wyrobiska korytarzowe) i geologicznymi (uskoki),

- wyznaczanie parametrów odprężenia wywołanego przez eksploatację odprężającą (zasięg poziomy, pionowy, intensywność, czas skutecznego odprężenia),
- kontrolę efektywności stosowanej profilaktyki, która zmienia strukturę pokładu węgla lub skał otaczających (nawadnianie, szczelinowanie UHS i USS, strzelanie),
- ocenę, na podstawie wartości prędkości rozchodzenia się różnych typów fal sejsmicznych, skłonności pokładów węgla i skał stropowych do tąpnięć.

Pod koniec lat 80. i na początku lat 90. została dopracowana i wdrożona, szczególnie w odniesieniu do kopalń węgla kamiennego, technika prześwietlania sejsmicznego między wyrobiskami górniczymi połączona z tomograficzną rekonstrukcją rozkładu pola mierzonego parametru sejsmicznego. Najczęściej jest to parametr prędkości rozchodzenia się fal sejsmicznych różnego typu lub współczynnik tłumienia (często stosuje się także współczynnik transmisji) ich amplitudy bądź energii. Powszechny dostęp do nowoczesnej bazy komputerowej pozwolił na znaczący wzrost efektywności metody sejsmicznej połączony z nowymi możliwościami wykorzystania informacji użytecznej zawartej w rejestrowanych sejsmogramach. Tym niemniej, w zakresie wspomnianej interpretacji geomechanicznej nie nastąpił żaden wyraźny postęp do stanu z końca lat 80. i uzyskiwane zdjęcia tomograficzne prześwietlanego fragmentu górotworu są najczęściej analizowane pod kątem jakościowym i w ograniczonym stopniu pod względem ilościowym.

Podstawowym parametrem sejsmicznym dla dalszych etapów interpretacji geomechanicznej jest anomalia sejsmiczna. W zależności od zmian, jakie nastąpiły w strukturze badanego ośrodka skalnego, występują dodatnie i ujemne anomalie, najczęściej prędkości rozchodzenia się fali sejsmicznej. Dodatnie anomalie wskazują na występowanie stref mogących stanowić miejsca koncentracji naprężeń (zagrożone tąpnięciami), natomiast ujemne anomalie są związane ze strefami o zniszczonej strukturze i odprężonymi (obniżone zagrożenie tąpnięciami). W specjalistycznej literaturze podane są różnego rodzaju skale oceny zagrożenia wstrząsami i tąpnięciami, oparte na powyższych dwóch typach anomalii prędkości rozchodzenia się fal sejsmicznych, głównie fali podłużnej w pokładzie węgla [4].

3. Zintegrowany wskaźnik zagrożenia tąpnięciami

3.1. Istota wskaźnika

Rozwiązania interpretacyjne, o których wspomniano powyżej, traktują problem zagrożenia związanego z występowaniem wstrząsów i tąpnięć oddzielnie, w stosunku do zjawisk o charakterze pokładowym i stropowym. W rzeczywistości trudno jest jednak jednoznacznie ustalić, jaki typ wstrząsów i zagrożenia będzie dominował w danych warunkach geologiczno-górnictwowych; najczęściej występują one razem, przy czym stropowa inicjacja wstrząsu jest często bezpośrednią przyczyną zaistnienia zjawiska tąpnięcia o charakterze pokładowym. Przy założeniu takiego mechanizmu rozwoju zjawiska istotne jest zlokalizowanie w pokładzie stref o wysokim wyężeniu, jako miejsc potencjalnie najbardziej zagrożonych, a także stref charakteryzujących się istnieniem niestabilności w kompleksie skał stropowych (np. pęknięcia i osłabienia), które tworzą potencjalne płaszczyzny poślizgu. Dotychczas, powyższe dwa elementy składowe decydujące o zagrożeniu, określane były oddzielnie, co mogło stwarzać pewne problemy interpretacyjne [1]. Z tej właśnie przyczyny podjęto prace nad opracowaniem jednolitego, zintegrowanego wskaźnika sejsmicznego, który będzie wykazywać wrażliwość zarówno na zmiany w strukturze pokładu węgla, jak i na zmiany w strukturze skał stropowych, sprzyjające rozwojowi zjawisk sejsmicznych. Potrzeba opracowania takiego wskaźnika okazała się szczególnie istotna w warunkach coraz bardziej powszechnego stosowania metody geotomografii sejsmicznej.

Oparty na takich założeniach zintegrowany, sejsmiczny wskaźnik zagrożenia tąpnięciami ma następującą postać:

$$Z = A_n \cdot K \quad (1)$$

gdzie :

Z – zintegrowany, sejsmiczny wskaźnik zagrożenia tąpnięciami, %,

A_n – dodatnia anomalia sejsmiczna prędkości fali P w pokładzie węgla, %,

K – współczynnik uwzględniający określoną na podstawie danych sejsmicznych wartość gradientu ciśnienia ($K=1 + 0,5 k_G G$; przy czym G - oznacza wyznaczony sejsmicznie gradient ciśnienia, [MPa/m]; parametr k_G – jest równy 1,0 i posiada wymiar [m/MPa]).

Tak więc wskaźnik Z posiada wymiar anomalii sejsmicznej wyrażonej w procentach, a współczynnik gradientu K jest wielkością bezwymiarową. Fizycznie czynnik A_n

charakteryzuje układ naprężeniowy w pokładzie węgla, a czynnik K opisuje formę anomalii sejsmicznej ukształtowaną przez oddziaływanie zewnętrznego układu sił, determinującego lokalną niestabilność w danym miejscu pomiarowym.

3.2. Ustalenie kryterialnych wartości wskaźnika Z

Dla ustalenia wartości kryterialnych zintegrowanego wskaźnika sejsmicznego Z, które charakteryzowałyby zmienne zagrożenie tąpnięciami, zostały przeprowadzone odpowiednie badania w wybranych kopalniach węgla kamiennego. Poligony pomiarowe obejmowały parcele ścianowe o zróżnicowanym poziomie zagrożenia tąpnięciami. Analiza polegała na korelacji danych sejsmicznych (wyniki prześwietlania połączonego z geotomograficznym przedstawieniem rozkładu prędkości rozchodzenia się fali sejsmicznej podłużnej P) z wynikami bieżących obserwacji sejsmologicznych (położenie obszarów występowania ognisk wstrząsów przed frontem eksploatacyjnym oraz wartość ich energii sejsmicznych, a w szczególności energii maksymalnej). Wyniki tej analizy wskazywały na grupowanie się ognisk wstrząsów w obszarach, w których wcześniej stwierdzano pomiarowo lokalne przyrosty naprężeń oraz zwiększone wartości wyznaczonych sejsmicznie gradientów ciśnienia. Zaobserwowano także, że wartości anomalii prędkości fal sejsmicznych korelowały się z maksymalną energią sejsmiczną.

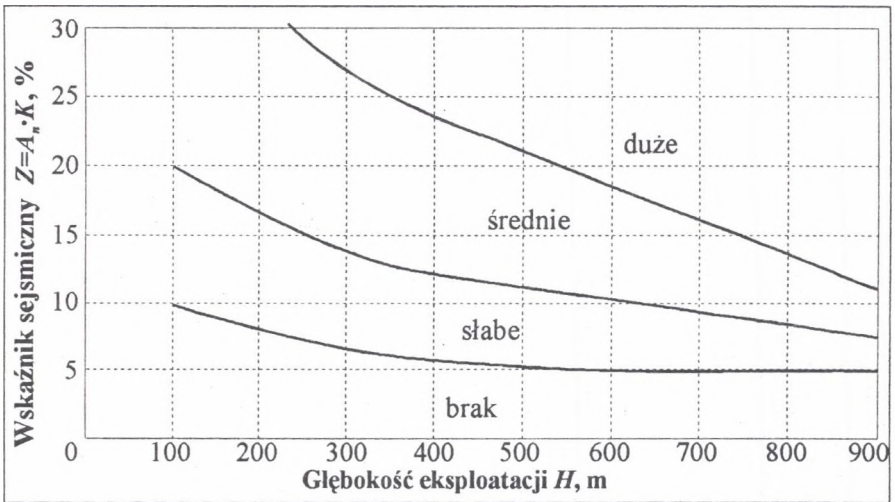
Zbiorcze zestawienie uśrednionych wyników, na podstawie których ustalono kryterialne wartości wskaźnika Z, przedstawia tablica 1.

Tablica 1

Kryterialne wartości wskaźnika Z w korelacji z pomiarowymi wielkościami fizycznymi

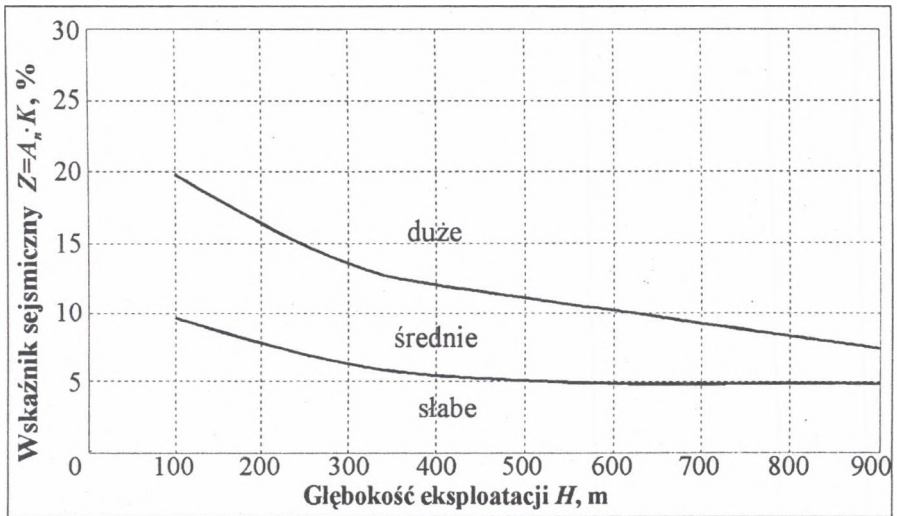
Stan zagrożenia tąpnięciami	Przedział (rząd) energii E_{max} , J	Anomalia A_n fali P, %	Przyrost ciśnienia Δp , MPa	Gradient ciśnienia, G, MPa/m	Parametr K [-]	Kryterialne wartości wskaźnika Z, %
a - brak	10^3	do 5	0 + 3	0,0 + 0,2	1,00	5,0
b - słabe	10^4	do 10	3 + 7	0,2 + 0,5	1,25	12,5
c - średnie	10^5	do 20	7 + 15	0,5 + 0,8	1,40	28,0
d - duże	10^6	ponad 20	ponad 15	ponad 0,8	1,60	32,0

Dla praktycznego określania zintegrowanego wskaźnika sejsmicznego Z opracowane zostały odpowiednie wykresy graficzne oddzielnie dla wyrobisk ścianowych i dla wyrobisk chodnikowych, z uwagi na ich różną odporność dynamiczną na wpływy sejsmiczne. Są one przedstawione na rys.1 i 2.



Rys. 1. Nomogram do wyznaczania stopnia zagrożenia tapaniami w oparciu o wartość wskaźnika sejsmicznego Z określaną na głębokości H – dla wyrobisk ścianowych

Fig. 1. Nomogram for determination of the rockburst hazard state based on value of the seismic index Z at depth H – longwall workings



Rys. 2. Nomogram do wyznaczania stopnia zagrożenia tapaniami w oparciu o wartość wskaźnika sejsmicznego Z określaną na głębokości H – dla wyrobisk chodnikowych

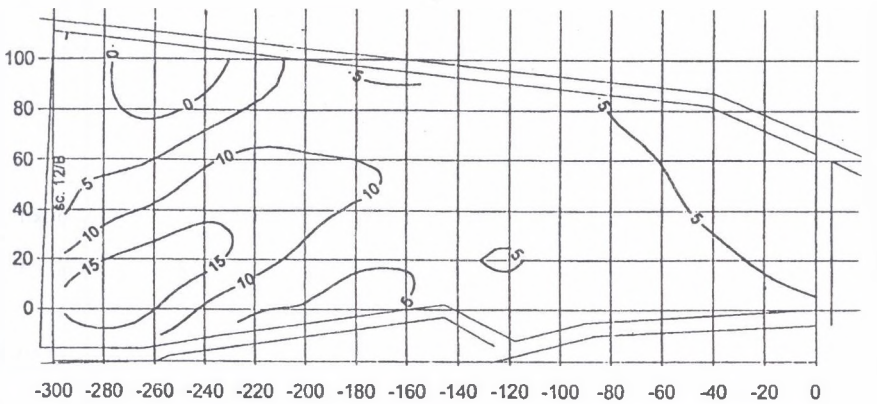
Fig. 2. Nomogram for determination of the rockburst hazard state based on value of the seismic index Z at depth H – heading workings

Wykresy te są podstawą specjalistycznego oprogramowania, służącego do wyznaczania map obszarów o różnym stanie zagrożenia sejsmicznego i zagrożenia tapaniami w prześwietlonym fragmencie górotworu.

3.3. Metodyka określania wskaźnika Z

Metodologia wyprzedzającego rozpoznania zagrożenia tapaniami, oparta na zintegrowanym wskaźniku sejsmicznym Z, obejmuje następujące etapy, które podano poniżej, ilustrując je wynikami konkretnego przykładu kopalnianego:

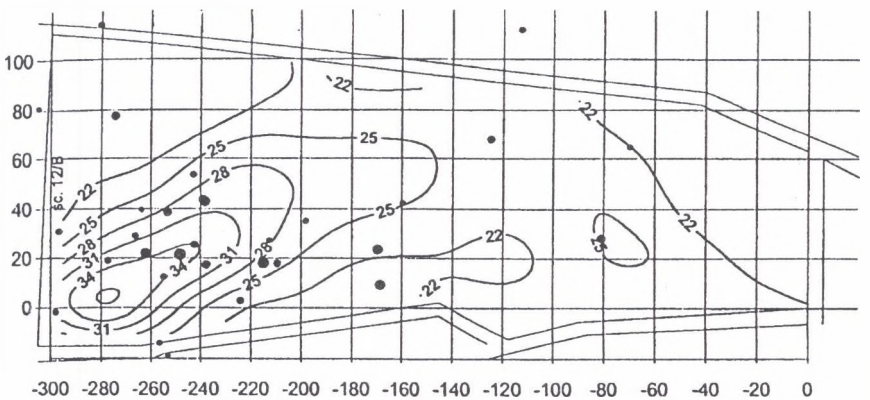
- określenie na podstawie dołowych pomiarów sejsmicznych mapy rozkładu anomalii sejsmicznej fali podłużnej P w pokładzie węgla - rys.3,



Rys. 3. Mapa rozkładu anomalii prędkości fali sejsmicznej podłużnej w pokładzie węgla

Fig. 3. Distribution map of the velocity anomaly of longitudinal seismic wave propagating in coal bed

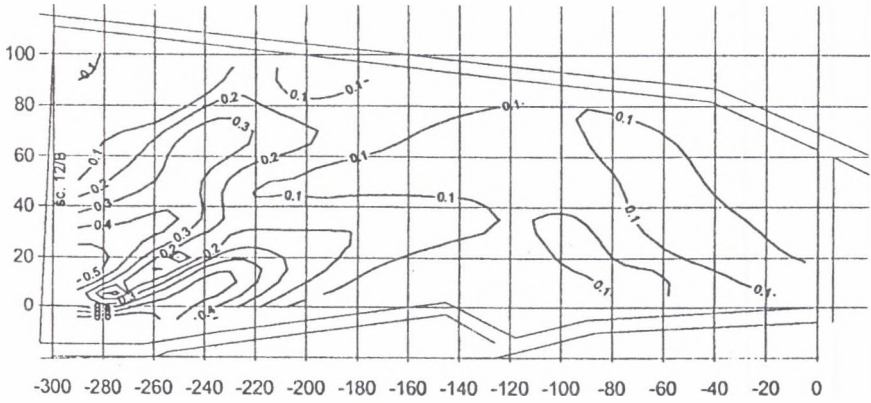
- transformacja mapy anomalii sejsmicznej na odpowiednią mapę rozkładu pionowej składowej naprężenia p_z^* (gdzie: $p_z^* = p_z^0 + \Delta p$), - rys.4,



Rys. 4. Rozkład pionowej składowej naprężenia p_z^* przed frontem ściany wraz z położeniem ognisk zarejestrowanych wstrząsów o różnej energii sejsmicznej

Fig. 4. Distribution of the vertical stress p_z^* component ahead longwall face and location of the foci recorded tremors with different seismic energy

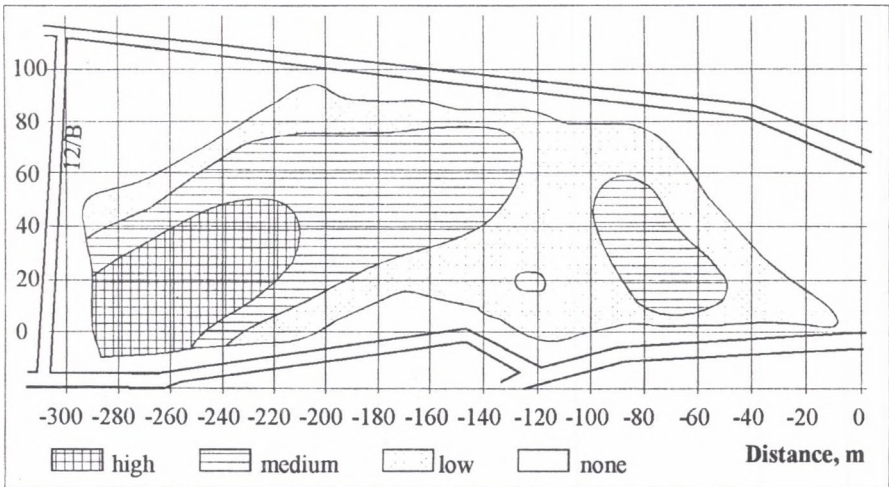
- sporządzenie mapy rozkładu gradientu ciśnienia - rys.5,



Rys. 5. Rozkład gradientu ciśnienia wyznaczonego na podstawie danych sejsmicznych przed frontem ściany

Fig. 5. Stress gradient distribution ahead the longwall face determined on the basis of seismic data

- wykonanie mapy rozkładu zintegrowanego, sejsmicznego wskaźnika zagrożenia tapaniami Z, z wydzieleniem stref o różnym stanie zagrożenia – rys.6,



Rys. 6. Mapa rozkładu zintegrowanego sejsmicznego wskaźnika zagrożenia tapaniami Z, z wydzieleniem stref o różnym stanie zagrożenia przed frontem ściany

Fig. 6. Distribution map of the integrated seismic index for rockburst hazard determination as basis for location zones with different state of hazard ahead longwall face

3.4. Wykorzystanie wskaźnika Z do rozpoznania zagrożenia łąpaniami

Mając ustalony rozkład stref zagrożenia przed frontem wyrobiska, uzyskany w oparciu o wartość wskaźnika Z, można tego typu dane wykorzystać w kompleksowej metodzie oceny stanu zagrożenia łąpaniami, jako jeden z bardziej efektywnych sposobów udokładnienia metody rozeznania górniczego [5]. I tak, poszczególnym stanom zagrożenia ustalonym na podstawie pomiarów sejsmicznych przypisuje się następujące wagi punktowe:

- stan a	brak zagrożenia	2 punkty,
- stan b	zagrożenie słabe	4 punkty,
- stan c	zagrożenie średnie	8 punktów,
- stan d	zagrożenie duże	16 punktów.

W przypadku wspólnego stosowania metody sejsmicznej i rozeznania górniczego wypadkowy stan zagrożenia ustala się jako średnią z obydwu metod:

$$ZT = \frac{1}{2}(RG + GS) \quad (2)$$

gdzie:

- ZT – stan zagrożenia łąpaniami,
- RG – stan zagrożenia według metody rozeznania górniczego,
- GS – stan zagrożenia według metody geotomografii sejsmicznej.

Wydaje się, że zintegrowany wskaźnik sejsmiczny Z, jako wynik bezpośrednich pomiarów w badanym górotworze, może w znaczącym stopniu udokładnić wynik znacznie przybliżonej oceny, opartej tylko na rozeznaniu górniczym. Stąd wszędzie, gdzie to jest możliwe, a w szczególności w złożonych i trudnych sytuacjach, metody te powinny stanowić podstawowy kompleks rozpoznania potencjalnego stanu zagrożenia łąpaniami.

4. Wnioski

1. Dla poprawienia efektywności i informatywności wyników dołowych pomiarów sejsmicznych, prowadzonych dla geomechanicznego rozpoznania struktury górotworu w aspekcie zagrożenia łąpaniami, wprowadzono określanie zintegrowanego wskaźnika sejsmicznego Z.

2. Wynikowe mapy rozkładu wskaźnika Z, wykonywane według opracowanej metodologii, odzwierciedlają wewnętrzny stan struktury badanego pokładu węgla, kształtowany przez lokalny rozkład naprężeń oraz stan niestabilności górotworu w jego otoczeniu zewnętrznym, głównie w wyżej zalegających kompleksach skał stropowych.
3. Analiza korelacyjna badań sejsmicznych z referencyjnymi wynikami uzyskanymi metodą sejsmologiczną (lokalizacja i energia sejsmiczna występujących wstrząsów) pozwoliła na ustalenie kryterialnych wartości wskaźnika Z, odzwierciedlających różne stany faktycznego zagrożenia tąpnięciami.
4. W aktualnym stanie rozwoju metodologicznego metody sejsmicznej i na podstawie wieloletnich doświadczeń z jej rozwoju należy stwierdzić, że metoda ta w pełni odpowiada warunkom stawianym metodom składowym stosowanym w kompleksowej ocenie stanu zagrożenia tąpnięciami; powinna być metodą równoważną w stosunku do metody rozeznania górniczego i stosowaną wspólnie z nią dla lepszej, wyprzedzającej oceny potencjalnego stanu zagrożenia tąpnięciami

LITERATURA

1. Dubiński J., 1989: Sejsmiczna metoda wyprzedzającej oceny zagrożenia wstrząsami górniczymi w kopalniach węgla kamiennego. Prace GIG, seria dodatkowa, Katowice.
2. Dubiński J., 1994: Geomechaniczna interpretacja wyników dołowych pomiarów sejsmicznych. Materiały Szkoły Eksploatacji Podziemnej' 94. Vol. II, wyd. PAN CPPGSMiE, Kraków, str.93-105.
3. Dubiński J., 1996: Rozwój geofizycznych metod rozpoznania zagrożeń naturalnych w kopalniach podziemnych. Materiały IV Konferencji Naukowo-Technicznej „Geofizyka w geologii i górnictwie”. Wyd. AGH, Krynica, str.7-18.
4. Dubiński J., 1996: Metody sejsmiki górnicznej, rozdział 9 [w]: Poradnik Geofizyka Górniczego, wyd. PAN CPPGSMiE, Kraków, str. 13-124.
5. Konopko W. i inni, 1996: Metoda rozeznania górniczego określania potencjalnego stanu zagrożenia tąpnięciami wyrobisk górnicznych.[w]: Zasady i zakres kompleksowej oceny stanu zagrożenia tąpnięciami w zakładach górnicznych wydobywających węgiel kamienny. Wyd. GIG, seria Instrukcje, nr 1, Katowice.

Abstract

A seismic method for premonitory recognition of the seismic hazard state is more and more used in underground hard coal mines. The development methodological solutions and, in particular, the seismic transmission technique used between workings in combination with the tomographic interpretation of measured seismic parameter distribution are the highly effective and informative searching practices. The classical solutions from the end of the eighties joint seismic results mainly with coal beds. They are the basis for determining the coal bed stress concentration intensity and extent parameters responsible for creating zones of higher rockburst hazard. Also, the local roof strata instability zones can be located and their parameters determined from the results of longwall coalface seismic transmission measurements. They are indicated by the negative seismic anomalies of P wave propagation velocity appearing in the characteristic, elongated form.

The developed integrated seismic index combines the above parameters, so it is sensitive to both the internal and external factors as far as the studied coal bed is concerned. Therefore, it shows the total local rockburst hazard state. From the results of underground measurements a procedure for determining the integrated seismic index and the appropriate nomograms and scales for assessing the rockburst hazard state from this index have been developed.

Practical examples confirm that using the integrated seismic index can result in a much precise and effective recognition of rockburst hazard.