



Wiesław GRZEBYK\*, Izabela Jaśkiewicz-Proć\*\*, Lech STOLECKI\*\*

## Szacowanie głębokości położenia ognisk wstrząsów na podstawie wskaźnika energetycznego EWG

Streszczenie: Zagadnieniem dotąd nierozwiązanym w kopalniach rud miedzi LGOM jest określenie pionowej lokalizacji ognisk wstrząsów. Podejmowane próby w tym względzie, bazujące na parametrach czasowych i amplitudowych rejestrowanych zjawisk sejsmicznych nie przyniosły dotychczas zadawalających rezultatów. Dająca pozytywne wyniki lokalizacji metoda, oparta na rejestracji układem stanowisk zlokalizowanych na różnej głębokościach w szybach kopalnianych posiada natomiast ograniczony zasięg odległościowy.

Zaproponowane przez autorów nowe podejście do wyznaczania pionowej lokalizacji ognisk wstrząsów polega na wykorzystaniu do tego celu, ich parametrów energetycznych określanych z rejestracji dołową siecią stanowisk sejsmicznych oraz siecią stanowisk powierzchniowych przeznaczonych do oceny oddziaływań sejsmicznych na obiekty powierzchniowe.

Niepodważalną przesłanką dla przyjętego rozwiązania jest istnienie obiektywnych relacji pomiędzy umowną energią sejsmiczną określaną na poziomie złożeń, względem umownej energii sejsmicznej wyznaczonej dla stanowisk powierzchniowych. Stosunek tych energii musi bowiem zależeć od wielkości tłumienia fali sejsmicznej na drodze przejścia od źródła wstrząsu do stanowisk pomiarowych, a tym samym od głębokości położenia ogniska wstrząsu.

Przeprowadzona analiza na zbiorze danych pomiarowych potwierdziła poprawność przyjętego rozwiązania, którego końcową postacią stanowi opracowany wskaźnik głębokości położenia ognisk wstrząsów. Uzyskane wyniki lokalizacji głębokościowej są zbieżne z pionową lokalizacją ognisk wstrząsów wyznaczoną na podstawie stanowisk sejsmicznych w szybach kopalnianych.

Słowa kluczowe: eksploatacja podziemna, wstrząsy sejsmiczne, lokalizacja ogniska wstrząsu

## Estimating the depth of tremors source based on their energetic parameters

Abstract: The so far unsolved question in LGOM copper ore mines is to determine the vertical location of the tremor source. Attempts made in this regard, based on time and amplitude parameters of recorded seismic phenomena

\* Mgr inż., \*\* Dr inż., KGHM Cuprum sp. zo. o. Centrum Badawczo-Rozwojowe, Wrocław; e-mail: Istolecki@cuprum.wroc.pl.

have not yielded satisfactory results so far. The location method, based on the seismic arrays located at different depths in the mine shafts which gives positive results, unfortunately has a limited distance range.

The new approach proposed by the authors to determine the vertical location of foci is based on the use of energy parameters determined by the underground seismic network as well as the network of surface stations designed to assess seismic impacts on surface objects.

A premise for the adopted solution is the existence of objective relations between seismic energy, defined at the level of the deposit, with respect to the contractual seismic energy determined for surface sites. The ratio of these energies must depend on the magnitude of the seismic wave damping on the path from the source of the tremor to the measuring stations, and hence from the depth of tremors source.

The analysis performed on the measured data fully confirmed the correctness of the adopted solution, the final form of which is the depth indicator of the tremor source. The results of the depth location coincide with the vertical location of the tremors determined by the seismic stations in the mining shaft.

Keywords: underground operation, induced tremor, location of tremor source

## Wprowadzenie

Jednym z przejawów deformacji górotworu naruszonego procesem wybierania złoża są deformacje niesprężyste. Ich efektem są wstrząsy sejsmiczne, których mierzalną postać stanowią rejestracje drgań odbieranych na danym stanowisku pomiarowym. Do podstawowych parametrów opisujących wstrząs sejsmiczny należy między innymi jego lokalizacja hipocentralna, tzn. położenie na płaszczyźnie i w pionie.

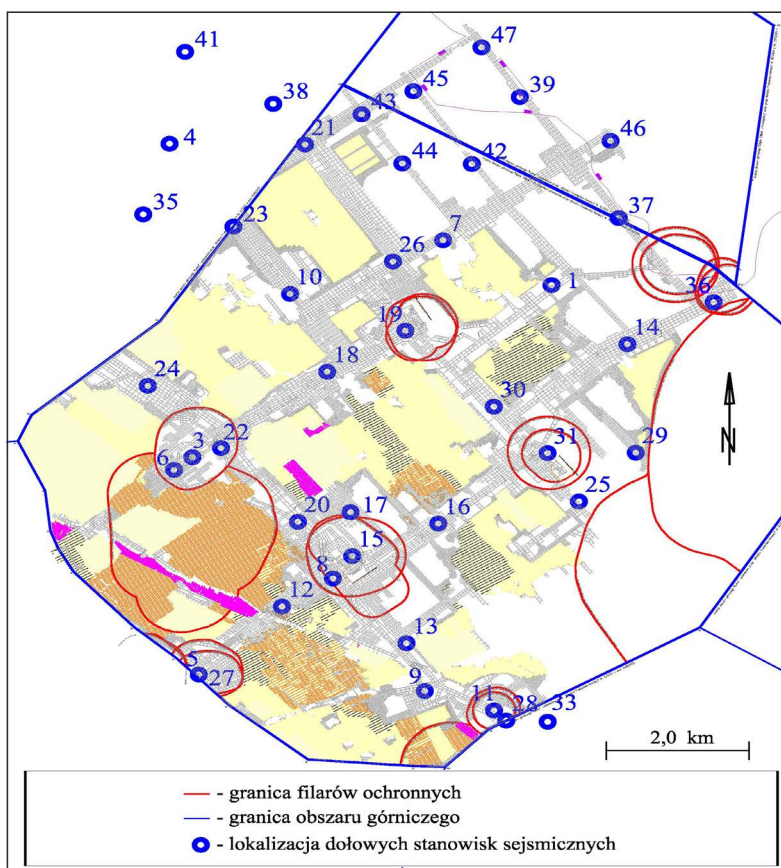
Znajomość lokalizacji hipocentralnej pozwala na prawidłową ocenę wpływu prowadzonej eksploatacji na zasięg deformacji w górotworze oraz na bieżące monitorowanie przebiegu deformacji ośrodka skalnego dla potrzeb oceny zagrożenia tąpnięciami.

W kopalniach rud miedzi LGOM, ze względu na płaskie, jednopokładowe wykształcenie złoża oraz płaski układ pomiarowy, w praktyce możliwa jest tylko lokalizacja epicentralna ognisk wstrząsów. Podejmowane próby wyznaczania pionowej lokalizacji ognisk wstrząsów (Grzebyk 1986; Grzebyk i in. 2003; Kijko i Król 1991), z wyjątkiem układu stanowisk szybowych (Grzebyk i in. 2004; Król 2008), nie przyniosły oczekiwanych, pozytywnych rezultatów.

Wychodząc z zależności tłumienia energii sejsmicznej od drogi przejścia fali sejsmicznej, autorzy do szacowania położenia głębokościowego ognisk wstrząsów postanowili wykorzystać rejestracje prowadzone dołową i powierzchniową siecią stanowisk sejsmicznych. Ponieważ wstrząsy sejsmiczne w kopalniach rud miedzi LGOM są generowane w wytrzymałych i sztywnych warstwach skalnych zalegających nad złożem, wysokość położenia ognisk wstrząsów powinna znaleźć swoje odzwierciedlenie w odpowiednich relacjach energii sejsmicznej rejestrowanej na poziomie złoża i na powierzchni terenu. Pośrednim potwierdzeniem słuszności przyjętego założenia są przypadki wysokoenergetycznych wstrząsów, o różnej skali oddziaływania na powierzchnię, jak i na wyrobiska górnicze. Uprawnione jest zatem przypisanie obserwowanych efektów oddziaływania tych wstrząsów do wysokości ich położenia. Przeprowadzone badania w tym zakresie oraz uzyskane wyniki potwierdzają poprawność przyjętego rozwiązania.

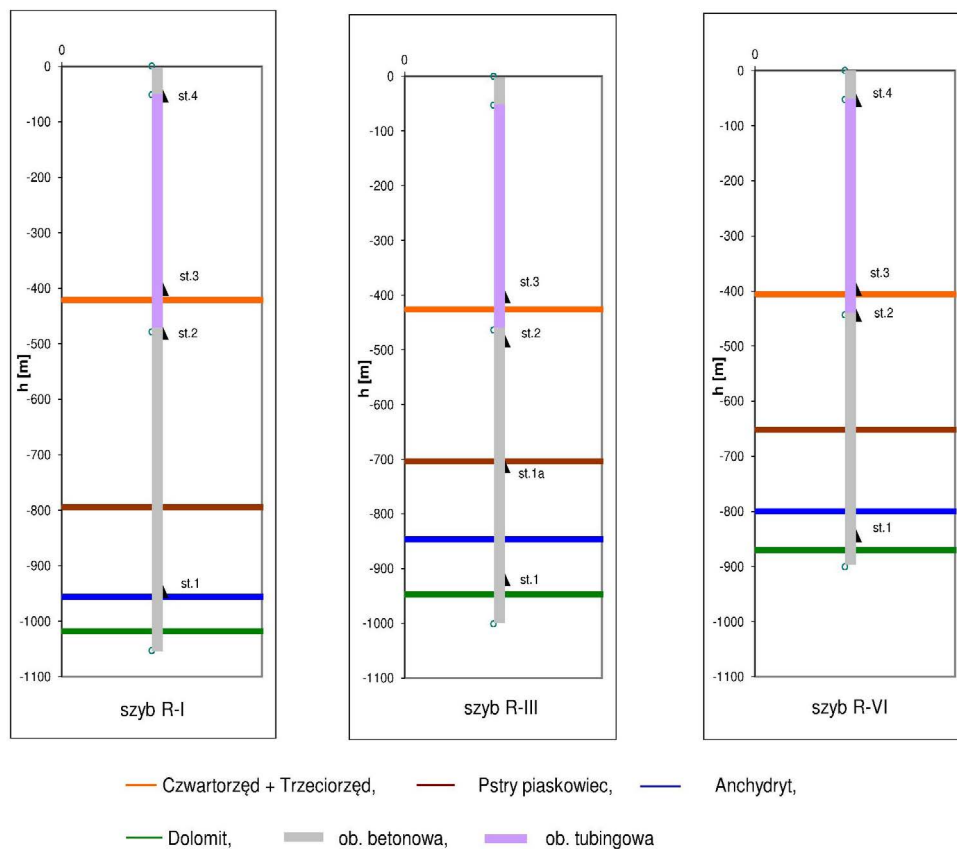
## 1. Obserwacje sejsmiczne prowadzone na obszarze LGOM

Prowadzona eksploatacja złoża rud miedzi LGOM wymusiła podjęcie szeroko zakrojonych obserwacji wstrząsów sejsmicznych. W początkowym okresie eksploatacji złoża problem ten dotyczył tylko zagadnień dołowych związanych z występowaniem zagrożenia tapaniami i zawałami. Ciągłe poszerzanie granic obszarów górniczych zdecydowało o budowie i funkcjonowaniu trzech oddzielnych kopalnianych stacji sejsmicznych, obejmujących swym zasięgiem wszystkie pola eksploacyjne. Aktualną lokalizację stanowisk sejsmicznych kopalni Rudna, na tle wyrobisk górniczych, przedstawiono na rysunku 1. Prowadzona analiza zdarzeń obejmuje wyznaczanie podstawowych parametrów wstrząsów sejsmicznych, w tym ich energii umownej i lokalizacji. Z początkiem 1990 r., podjęto także obserwacje drgań obudów szybowych poprzez instalacje w wybranych szybach kopalnianych układu stanowisk pomiarowych zlokalizowanych na różnej głębokości (rys. 2).



Rys. 1. Lokalizacja stanowisk sejsmicznych kopalni Rudna na tle wyrobisk górniczych

Fig. 1. The location of the seismic arrays of the KGHM Rudna copper mine against the background of the mining situation

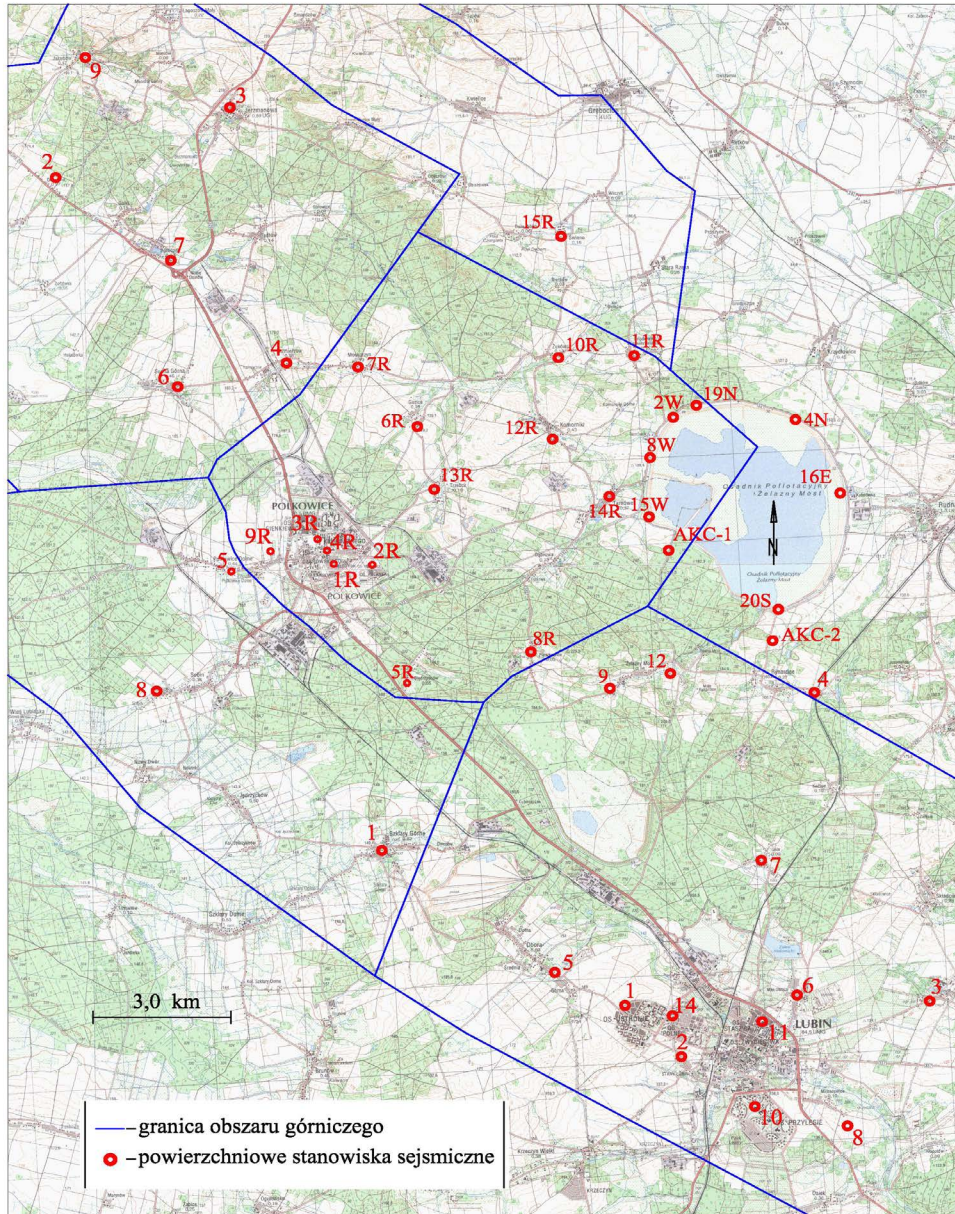


Rys. 2. Lokalizacja stanowisk pomiarowych systemu ARP w szybach

Fig. 2. The location of the measurement stations of ARP system in mining shafts

W związku z ujawnieniem się szkodliwego oddziaływania wstrząsów sejsmicznych na infrastrukturę powierzchniową, z końcem 1994 r. założono sukcesywnie rozbudowywaną, powierzchniową sieć stanowisk sejsmicznych pracujących w trybie stanowisk autonomicznych, jak i z systemem przesyłania danych do stacji sejsmicznej. Obserwacje sejsmiczne powierzchniowe ukierunkowane były głównie na monitorowanie budynków mieszkalnych oraz zapory ziemnej zbiornika osadowego Żelazny Most. Rozmieszczenie powierzchniowych stanowisk sejsmicznych przedstawiono na rysunku 3. Analizę i ocenę zarejestrowanych drgań na powierzchni prowadzi się zgodnie z „Górnictwem skalą intensywności sejsmicznej GSI-2004/11 dla wstrząsów górniczych w LGOM”.

Ogólnie ujmując, w rezultacie istnienia dwóch sieci sejsmicznych: dołowej i powierzchniowej, większość wysokoenergetycznych wstrząsów sejsmicznych jest równocześnie rejestrowana obydwojema sieciami pomiarowymi.



Rys. 3. Rozmieszczenie powierzchniowych stanowisk sejsmicznych

Fig. 3. Location of the surface seismic stations

## 2. Pionowa lokalizacja ognisk wstrząsów z wykorzystaniem stanowisk szybowych

Podstawowym przeznaczeniem obserwacji sejsmicznych prowadzonych w szybach kopalń rud miedzi jest ocena oddziaływań dynamicznych pochodzących od wstrząsów sejsmicznych na stan techniczny obudowy szybowej. Obserwacje te prowadzone są na ogół układem czterech stanowisk sejsmicznych zlokalizowanych na różnej głębokości, z uwzględnieniem rodzaju obudowy (murowa, betonowa, tubingowa) i budowy geologicznej górotworu za obudową szybu (rys. 2).

Pionowe zróżnicowanie stanowisk sejsmicznych postanowiono wykorzystać także do wyznaczania pionowej lokalizacji ognisk wstrząsów. Szczególnie użyteczna w tym zakresie była zawsze lokalizacja jednego ze stanowisk pomiarowych blisko poziomu złoża, co stanowiło czasową bazę odniesienia dla wstrząsów występujących na tej głębokości. Dla przyjętego modelu prędkościowego górotworu został opracowany algorytm oraz program lokalizacyjny, który umożliwiał wyznaczanie pionowej lokalizacji wstrząsów dla ich znanej lokalizacji epicentralnej (Grzebyk i Leśniak 2005). W praktyce okazało się, że uzyskanie w miarę poprawnej lokalizacji pionowej (dokładność lokalizacji od kilkunastu do dwudziestu kilku metrów) jest możliwe tylko do określonej odległości od danego szybu, tj. około 600–1300 m. Dla celów ruchowych opracowano uproszczony sposób wyznaczania pionowej lokalizacji ognisk wstrząsów na podstawie specjalnych nomogramów, z wykorzystaniem różnicy wejścia fali sejsmicznej dla stanowisk pomiarowych zlokalizowanych na poziomie  $(t_{st1})$  i górnej części pstręgo piaskowca  $(t_{st2})$ .

Przeprowadzona analiza głębokościowa ognisk wstrząsów występujących w trzech rejonach eksploatacji przyszybowej dla kilkuset zjawisk o energii równej i większej E3 J pozwoliła na wyznaczenie rozkładu głębokościowego tych wstrząsów i powiązanie ich z budową geologiczną górotworu (rys. 4).

## 3. Energetyczny wskaźnik pionowego położenia ognisk wstrząsów

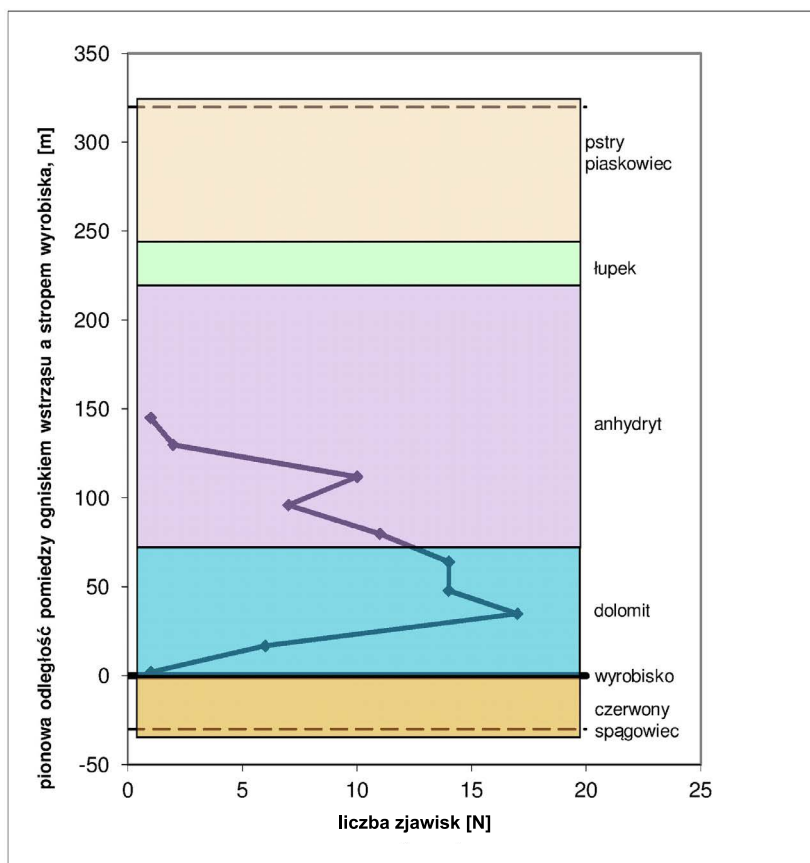
Szacowanie położenia głębokościowego ognisk wstrząsów polega na porównaniu umownej energii sejsmicznej wstrząsów określanych na podstawie ich rejestracji dołową i powierzchniową siecią stanowisk sejsmicznych. Miarą tego położenia jest tzw. energetyczny wskaźnik pionowego położenia ognisk wstrząsów (w skrócie EWG), który jest stosunkiem energii sejsmicznej wyznaczonej obydwoma sieciami:

$$EWG = E_{ps}/E_s \quad (1)$$

gdzie:

$E_{ps}$  – umowna energia sejsmiczna wyznaczona na podstawie rejestracji pochodzących ze stanowisk powierzchniowych [J],

$E_s$  – energia sejsmiczna wyznaczona przez kopalnianą stację sejsmiczną [J].



Rys. 4. Rozkłady głębokościowe ognisk wstrząsów na tle budowy geologicznej górotworu w rejonie szybu R-VI (wg pomiarów szybowych)

Fig. 4. The graph of depth of tremors focus against the background of the geological structure of rock mass in the R-VI shaft area (acc. to the indicator EWG)

W kopalniach LGOM (Lubin i Polkowice-Sieroszowice) energię sejsmiczną ognisk wstrząsów wyznacza się na podstawie czasu trwania zapisu wstrząsu na pionowej składowej drgań według wzoru:

$$\log E_s = A \log t + B \log R + C \quad (2)$$

gdzie:

- $E_s$  – energia sejsmiczna wstrząsu [J],
- $R$  – odległość ogniska wstrząsu od stanowiska sejsmicznego [m],
- $t$  – czas trwania drgań od wstrząsu na sejsmogramie [s],
- $A, B, C$  – współczynniki stałe.

W kopalni Rudna stosuje się metodę opartą na numerycznej procedurze całkowania sejsmogramu, która pozwala obliczać energię sejsmiczną zjawiska. W ogólności zależność pomiędzy energią sejsmiczną określonej grupy falowej a jej parametrami określanymi z sejsmogramu można zapisać w domenie czasu następująco:

$$E_s = K_1 \int_{t_1}^{t_2} A_v(t)^2 dt \quad (3)$$

gdzie:

- $K_1$  – jest funkcją prędkości propagacji fali, gęstości ośrodka, odległości rejestracji, właściwości tłumiących górotworu,
- $A_v(t)$  – amplituda prędkości drgań ośrodka,
- $t$  – czas drgań zjawiska ( $t_1$  – początek zjawiska,  $t_2$  – koniec zjawiska).

W przypadku określania umownej energii sejsmicznej powierzchniowej jako optymalną uznano metodę jej wyznaczania opartą na wzorach empirycznych uwzględniających wartości amplitudy prędkości drgań (Jaśkiewicz-Proć 2012):

$$PGV_{Hmax} = E^{0,4393} \cdot R_e^{-0,6159} \cdot t_{HV}^{-0,5188} \quad (4)$$

gdzie:

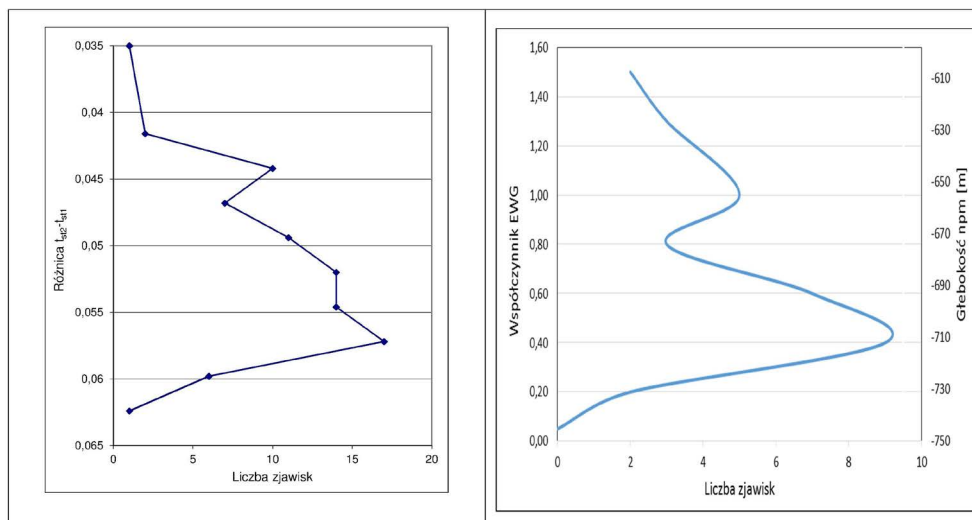
- $PGV_{Hmax}$  – maksymalna amplituda prędkości drgań składowych poziomych [mm/s],
- $E$  – energia sejsmicznego wstrząsu górniczego [J],
- $R_e$  – odległość epicentralna [m],
- $t_{HV}$  – czas trwania składowych poziomych amplitudy prędkości drgań gruntu [s].

Końcowa wartość energii powierzchniowej była wynikiem uśrednienia tej energii dla kilku stanowisk (5–7). Energetyczny wskaźnik EWG wyznaczono dla stu kilkudziesięciu zjawisk sejsmicznych o energii rzędu E6 J i większej. Zakres wartości wskaźnika mieścił się w przedziale wartości od 0,05 do 1,5, zaś jego rozkłady były bardzo zbliżone do rozkładów głębokościowych wstrząsów wyznaczonych dla rejonu danego szybu (rys. 5), pomimo różnic wynikających z tłumienia amplitudy fali w niejednorodnym górotworze.

#### 4. Korelacja uzyskanych wyników lokalizacji z budową litologiczną górotworu

Znajomość zasięgu głębokościowego niesprężystych deformacji górotworu ma istotne znaczenie dla planowanej eksploatacji. Poprzez odpowiedni dobór parametrów eksploatacyjnych można bowiem do pewnego stopnia kierować procesem deformacji ośrodka skalnego, a tym samym wpływać na poziom zagrożenia sejsmicznego i tąpnięciami. W warunkach złoża rud miedzi ogniska wstrząsów występują w mocnych i sprężystych warstwach stropowych, które, w zależności od danego rejonu, posiadają zmienną miąższość. Często





Rys. 5. Porównanie rozkładów energetycznego wskaźnika głębokości z rozkładami różnic czasowych wstrząsów wyznaczonych dla rejonu szybu R-VI

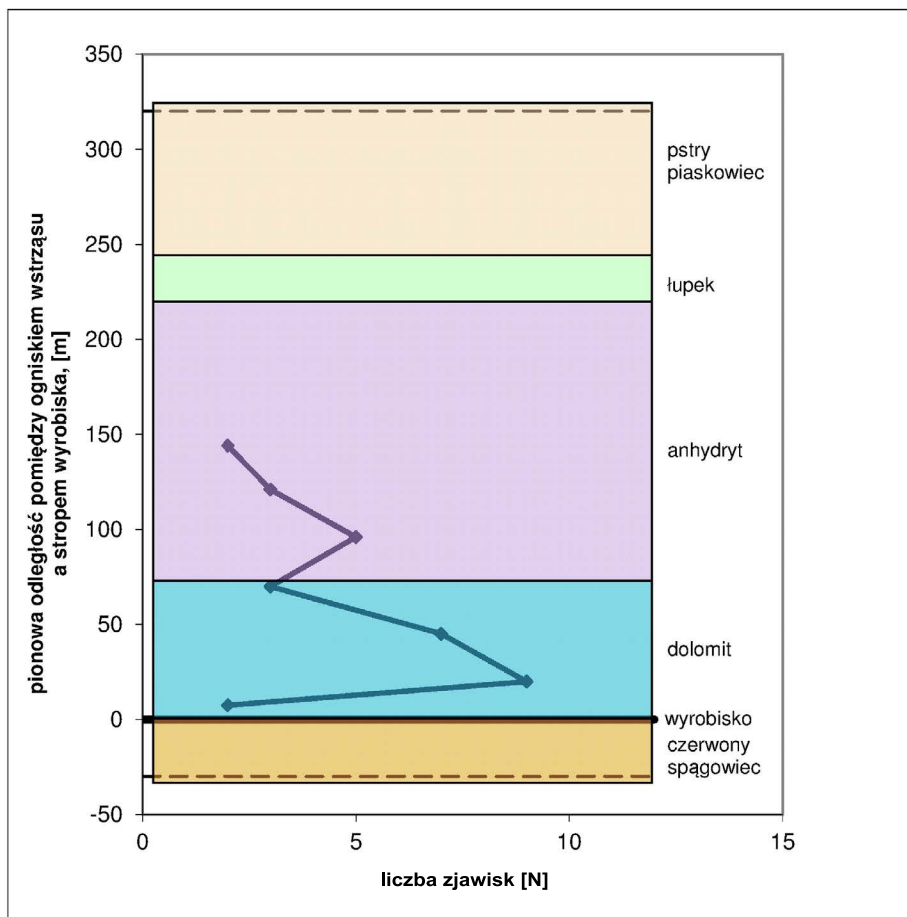
Fig. 5. The comparison of the graph of depth indicator to the graph of the time difference measured in the R-VI shaft's seismic stations

też, w odniesieniu do obserwowanej aktywności sejsmicznej przywołuje się określenie tzw. warstwy wstrząsogennej, jako tej, w której głównie dochodzi do generowania wstrząsów sejsmicznych.

W powyższym kontekście, uzyskane rozkłady parametrów czasowych z rejestracji sejsmicznych szybowych (rys. 4) oraz wskaźnika energetycznego EWG (rys. 6), w zestawieniu z budową geologiczną górotworu wskazują na koncentrację ognisk wstrząsów w dwóch strefach. Pierwsza z nich obejmuje pakiet skał dolomitowych z przesunięciem maksimum w jego dolną część oraz dolną część skał anhydrytowych włącznie z kontaktem ze skałami dolomitowymi. Lepszą korelację uzyskanych wyników wskaźnika głębokościowego z ich przypisaniem do danego pakietu skalnego utrudnia brak dokładnego rozpoznania budowy warstw stropowych powyżej 20 m nad wyrobiskami.

### Podsumowanie

Przedstawiony sposób szacowania głębokości ognisk wstrząsów na podstawie ich parametrów energetycznych, z wykorzystaniem dołowej i powierzchniowej sieci stanowisk pomiarowych jest niewątpliwie rozwiązaniem poprawnym. Uzyskane zróżnicowanie wartości wskaźnika głębokościowego EWG, czyli stosunku umownej energii sejsmicznej określonej na powierzchni terenu i na poziomie złoża przekłada się na jakościową informację o położeniu głębokościowym ogniska wstrząsu. Problemem pozostaje dowiązanie się wynikami obserwacji do rzeczywistej lokalizacji hipocentralnej danego zjawiska. Ze względu na



Rys. 6. Rozkłady głębokościowe ognisk wstrząsów na tle budowy geologicznej górotworu w rejonie szybu R-VI (wg wskaźnika EWG)

Fig. 6. The graph of depth of tremors focus against the background of the geological structure of the rock mass in the R-VI shaft area (acc. to the EWG indicator)

uwarunkowania zalegania złoża miedzi i możliwości pomiarowe dalsze prace powinny być ukierunkowane na uściślenie zależności wskaźnika głębokościowego z pionową lokalizacją ognisk wstrząsów tych samych zjawisk, określoną na podstawie parametrów czasowych uzyskanych z rejestracji w szybach kopalnianych. Przeprowadzenie tego typu skalowania dla wszystkich rejonów szybów danej kopalni umożliwi wyznaczanie pionowej lokalizacji ognisk wstrząsów na podstawie wskaźnika EWG, w dowolnym rejonie kopalni.

Praca zrealizowana w ramach badań statutowych KGHM Cuprum CBR.

## Literatura

- Grzebyk, W. 1986. *Prowadzenie obserwacji aktywności sejsmicznej celem lokalizacji hipocentralnej ognisk wstrząsów*. Opracowanie KGHM Cuprum CBR – niepublikowane, Wrocław.
- Grzebyk i in. 2003 – Grzebyk, W., Król, M., Stolecki, L. i Szłapka M. 2003. Określenie zasięgu głębokościowego zjawisk dynamicznych w kopalniach LGOM. *Materiały Konferencyjne XXVI Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej*. Łądek Zdrój, s. 427–438.
- Grzebyk i in. 2004 – Grzebyk, W., Leśniak, A., Halbersztadt, D. i Rajczakowski, J. 2004. Pionowa lokalizacja ognisk wstrząsów w przyszybowych rejonach eksploatacji O/ZG Rudna. *Materiały Konferencyjne XXVII ZSMG*. Zakopane 2004, s. 653–660.
- Grzebyk, W. i Leśniak, A. 2005. *Określenie głębokości ognisk wstrząsów przy eksploatacji przyszybowej*. Opracowanie KGHM Cuprum CBR – niepublikowane. Wrocław.
- Jaśkiewicz-Proć i in. 2012 – Jaśkiewicz-Proć, I., Jaśkiewicz, K. i Stolecki, L. 2012. *Weryfikacja wzorów empirycznych określających poziom parametrów drgań gruntu wywołanych wstrząsami górniczymi z uwzględnieniem różnych przedziałów energii wstrząsów*, Opracowanie KGHM Cuprum CBR – niepublikowane, Wrocław.
- Kijko, A. i Król, M. 1991. Względna lokalizacja wstrząsów górotworu – ocena efektywności metody. *Przegląd Górniczy* nr 10, s. 328–335.
- Król, M. 2008. Próba określenia głębokości wstrząsów górniczych w kopalni rudy miedzi „Polkowice-Sieroszowice”. *Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie* 3, s. 34–40.

