

ADAM LURKA\*, GRZEGORZ MUTKE\*\*

## **Poprawa dokładności lokalizacji składowej pionowej hipocentrow wstrząsów górniczych**

### **Wprowadzenie**

W rozpoznaniu, ocenie i zwalczaniu zagrożenia sejsmicznego i zagrożenia tąpnięciem bardzo istotną rolę odgrywają obserwacje sejsmologiczne. Dzięki analizie wstrząsów zarejestrowanych przez kopalniane sieci sejsmologiczne można uzyskać informacje o skali i miejscu zagrożenia, niezbędną dla podejmowania decyzji odnośnie profilaktyki tąpniowej, w tym właściwych parametrów eksploatacyjnych dla bezpiecznego prowadzenia frontów eksploatacji. Informacje sejsmologiczne (parametry źródła sejsmicznego, mechanizm wstrząsu, energia, aktywność sejsmiczna itp.) są w pełni wartościowe, gdy mogą być odniesione do konkretnego miejsca w masywie skalnym. Oznacza to, że ważnym elementem analizy każdego wstrząsu jest wyznaczenie jego hipocentrum, czyli przestrzennych współrzędnych ogniska. W warunkach polskich kopalń podziemnych zagrożonych wstrząsami górniczymi, niestety z reguły obliczane są tylko współrzędne poziome ogniska wstrząsu, tzn. w płaszczyźnie X, Y. O takim stanie rzeczy decyduje niedoinwestowanie w sprzęt sejsmologiczny, często niewłaściwy kierunek modernizacji istniejących sieci sejsmologicznych, zbyt mała świadomość odnośnie znaczenia lokalizacji pionowej ognisk wstrząsów do prognozowania zagrożenia tąpnięciem oraz brak specjalistycznego oprogramowania i znajomości parametrów górotworu niezbędnych do lokalizacji hipocentrow (prędkości kierunkowe).

Przedmiotem artykułu jest przedstawienie metody umożliwiającej w praktyce lokalizację wstrząsów w pionie z dokładnością porównywalną do lokalizacji w poziomie (kilkadziesiąt metrów). Do lokalizacji ognisk wstrząsów zastosowano metodę pierwszych wejść fali P

---

\* Dr inż., \*\* Doc. dr hab. inż., Główny Instytut Górnictwa, Katowice; e-mail: g.mutke@gig.katowice.pl

(Gibowicz, Kijko 1994; Marcak, Zuberek 1994; Lurka i in. 1997; Lurka 2000) oraz zmodyfikowany program MULTILOK (Lurka i Logiewa 2007). Pierwszym ważnym warunkiem poprawnej lokalizacji składowej pionowej jest wykorzystanie sieci przestrzennej. Drugim, równie ważnym warunkiem jest uwzględnienie w algorytmach lokalizacyjnych średnich prędkości stanowiskowych, które odpowiadają ich usytuowaniu względem rejonów sejsmiczności. Sieć sejsmologiczną przestrzenną można uzyskać rozmieszczając sejsmometry na różnych poziomach wydobywczych, lokalizując stanowiska w szybach górniczych lub w otworach wiertniczych oraz wykorzystując stanowiska powierzchniowe połączone wspólną podstawą mierzenia czasu ze stanowiskami podziemnymi. W procedurze obliczania lokalizacji hipocentrowo zastosowano algorytmy numeryczne z użyciem tzw. funkcji straty. W obliczeniach lokalizacyjnych użyto normy L2 oraz zmiennej, tzn. innej dla poszczególnych stanowisk prędkości sejsmicznej. Lokalizację wstrząsów dokonano dla sieci „płaskiej” – stanowiska sejsmometryczne słabo zróżnicowane głębokościowo oraz dla sieci „przestrzennej” – stanowiska sejsmometryczne zróżnicowane głębokościowo (Drzęzła 1994; Dubiński i in. 2004).

### **1. Błędy przy komputerowej lokalizacji ognisk wstrząsów**

Dane pochodzące z realnych pomiarów sejsmologicznych są zawsze obarczone mniejszymi lub większymi błędami. Dotyczy to również danych, na podstawie których lokalizuje się hipocentra wstrząsów: zarówno prędkości fal sejsmicznych jak i czasy pierwszych wejść nie dają się zmierzyć dokładnie. Tym ostrożniej więc podchodzić musimy do wyników lokalizacji, których wiarygodność zależy przecież nie tylko od dokładności danych, ale także od pewnych cech charakteryzujących układy równań rozwiązywane przy lokalizacji (tzw. uwarunkowanie zadania) i ściśle związanych z konfiguracją sieci sejsmometrów (Lurka 2000). Niefortunnie ustawiona sieć „wzmocnić” może błędy danych, prowadząc do bezwartościowych wyników, poprawna sieć pozwala lokalizować optymalnie. Stąd właśnie optymalizacja sieci sejsmometrów jest bardzo ważna. Szereg cennych uwag oraz szerszy opis analizy i rodzajów błędów występujących przy obliczeniach numerycznych można znaleźć na przykład w pracach Bjork, Dahlquist (1987) oraz Dryja i in. (1988). W warunkach polskich kopalnianych sieci sejsmologicznych ich optymalizacja najczęściej ogranicza się do warunku wiarygodnej lokalizacji składowych poziomych, tzw. epicentrum wstrząsu – współrzędne XY, bez ukazywania skali błędów dla składowej pionowej.

Na potrzeby niniejszego artykułu wykorzystano podstawy teoretyczne metody szacowania błędów lokalizacji opartej na teorii funkcji uwikłanych oraz na rachunku prawdopodobieństwa (Lurka 2000). Wstępne i ogólne zasygnalizowanie powyższych zagadnień jest zawarte również w pracy Lurki (1996), gdzie przedstawiono pewne wyniki w formie analizy błędów lokalizacji dla modelowej sieci sejsmologicznej. Generalnie opracowana metoda określania błędów lokalizacji hipocentrowo wstrząsów wykorzystująca teorię funkcji uwikłanych posiada następujące cechy:

- uzyskano – w wyniku linearyzacji – niezależność oszacowania błędów od typu rozkładu rządzącego procesem, tzn. nie jest wymagane założenie, że rozkład błędów ma postać rozkładu Gaussa,
- stwarza możliwość określania błędów lokalizacji jako wyniku zaburzeń parametrów wejściowych na jednym stanowisku sejsmometrycznym,
- wprowadza nowy sposób uwzględniania błędów w modelu prędkościowym ośrodka,
- pozwala obliczać i analizować błędy czasów wejść fali sejsmicznej na pojedynczym stanowisku sejsmicznym.

W prezentowanych obliczeniach błędów lokalizacji dla składowej pionowej ognisk wstrząsów przyjęto, że lokalizacja ogniska jest dokonywana metodą najmniejszych kwadratów polegającą na minimalizacji funkcji:

$$F(x_0, y_0, z_0, t_0) = \sum_{i=1}^n (t_i - q_i)^2 \quad (1)$$

gdzie:

- $x_0, y_0, z_0$  – współrzędne ogniska,
- $t_0$  – czas wystąpienia wstrząsu,
- $t_i$  – czas pierwszego wstąpienia fali,
- $q_i = t_0 + \frac{d_i}{v}$  – teoretyczny czas przejścia fali na odcinku ognisko–stanowisko numer  $i$ ,
- $d_i$  – odległość ognisko–stanowisko numer  $i$ ,
- $n$  – ilość stanowisk sieci sejsmometrycznej,
- $v$  – prędkość fali sejsmicznej.

Wtedy macierz kowariancji obliczanych parametrów ogniska tzn.  $x_0, y_0, z_0, t_0$  wynosi:

$$c_t = \sigma_t^2 \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial q_i}{\partial x_0} \right)^2 & \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial q_i}{\partial x_0} \right) \left( \frac{\partial q_i}{\partial y_0} \right) & \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial q_i}{\partial x_0} \right) \left( \frac{\partial q_i}{\partial z_0} \right) & \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial q_i}{\partial x_0} \right) \\ \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial q_i}{\partial x_0} \right) \left( \frac{\partial q_i}{\partial y_0} \right) & \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial q_i}{\partial y_0} \right)^2 & \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial q_i}{\partial y_0} \right) \left( \frac{\partial q_i}{\partial z_0} \right) & \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial q_i}{\partial y_0} \right) \\ \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial q_i}{\partial x_0} \right) \left( \frac{\partial q_i}{\partial z_0} \right) & \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial q_i}{\partial y_0} \right) \left( \frac{\partial q_i}{\partial z_0} \right) & \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial q_i}{\partial z_0} \right)^2 & \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial q_i}{\partial z_0} \right) \\ \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial q_i}{\partial x_0} \right) & \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial q_i}{\partial y_0} \right) & \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial q_i}{\partial z_0} \right) & n \end{bmatrix}^{-1} \quad (2)$$

gdzie:

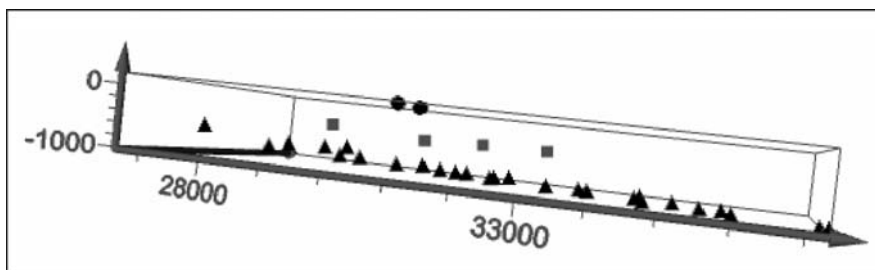
- $\sigma_t$  – odchylenie standardowe dla czasów wejścia fali równe dla każdej zmiennej  $t_i$ .

Ta szczególna postać oszacowania macierzy kowariancji parametrów ogniska jest najczęściej spotykana w literaturze (Drzęzła 1994; Gibowicz, Kijko 1994; Lurka 2000).

W artykule przez błąd lokalizacji rozumie się więc wartość odchylenia standardowego dla danej zmiennej, np. składowej pionowej  $Z$  hipocentrow zjawisk sejsmicznych.

Dla jasnego zobrazowania i oceny dokładności lokalizacji obliczono mapy błędów lokalizacji współrzędnej pionowej  $Z$  na poligonie badawczym dla dwóch wariantów. W pierwszym wariantcie dla sieci „płaskiej” składającej się tylko z stanowisk podziemnych, bez stanowisk szybowych – najczęściej stosowany wariant w polskich kopalniach i w drugim wariantcie dla sieci „przestrzennej”, składającej się z stanowisk podziemnych, podziemnych szybowych i dwóch dodatkowych powierzchniowych.

Poglądowy schemat rozmieszczenia stanowisk sejsmicznych na poligonie badawczym przedstawiono na rysunku 1. Stanowiska podziemne zlokalizowane są na poziomie eksploatacji (700–900 m w rejonie poligonu badawczego). Stanowiska w szybach zainstalowano w połowie odległości pomiędzy poziomem eksploatacji a powierzchnią.



Rys. 1. Rozmieszczenie sejsmometrów sieci sejsmologicznej na poligonie badawczym, użytych do obliczeń lokalizacji hipocentrow ognisk wstrząsów (czarne trójkąty – stanowiska podziemne, szare kwadraty – stanowiska w szybach, czarne kółka – stanowiska powierzchniowe)

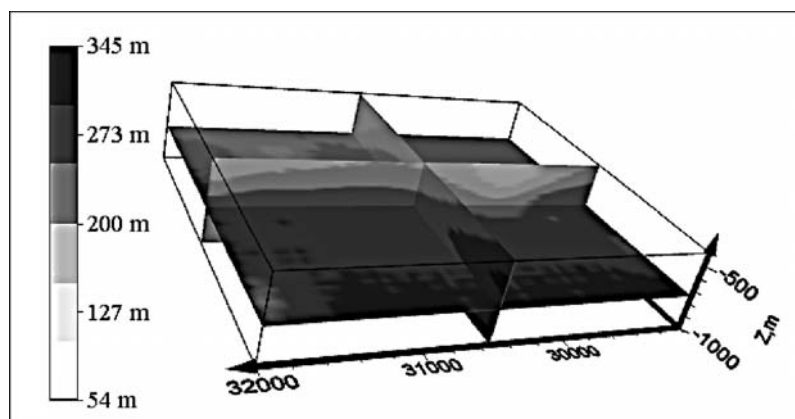
Fig. 1. Distribution of seismometers in study site used to calculating hypocenters of mining tremors (black triangles – underground stations, grey squares – stations in shafts, black circles – surface stations)

#### **Wariant I – sieć „płaska”**

Na rysunku 2 przedstawiono mapę statystycznego błędu lokalizacji składowej  $Z$  dla wybranego oddziału eksploatacyjnego przy uwzględnieniu lokalizacji tylko z stanowisk podziemnych. W rejonie wybranego oddziału eksploatacyjnego błędy lokalizacji składowej  $Z$  wynoszą od ponad 100 do 300 metrów.

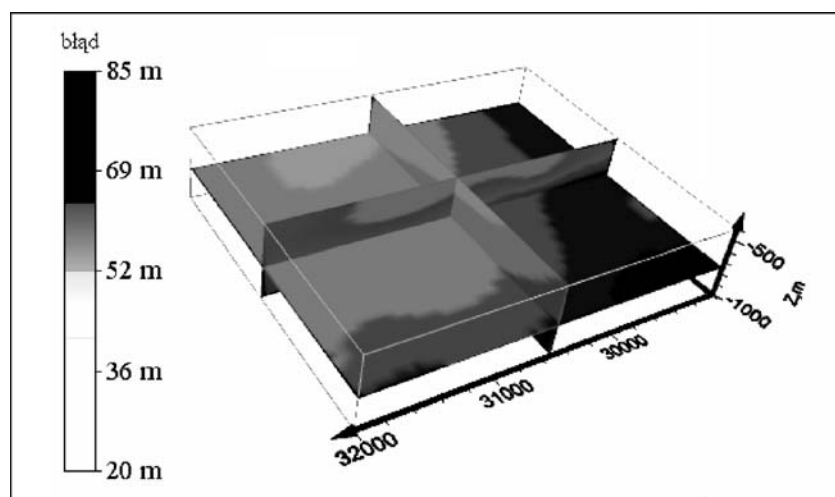
#### **Wariant II – sieć „przestrzenna”**

Na rysunku 3 przedstawiono mapy błędów lokalizacji składowej  $Z$  dla wybranego oddziału eksploatacyjnego przy uwzględnieniu lokalizacji z stanowisk podziemnych, stanowisk w szybach oraz dwóch stanowisk powierzchniowych posadowionych nad badanym oddziałem eksploatacyjnym. Błędy lokalizacji składowej  $Z$  zmieniają się w rejonie poligonu badawczego od 30 do 70 metrów. Można zauważyć wyraźną poprawę dokładności wyznaczania składowej  $Z$ , gdyż ta sieć jest już siecią przestrzenną. Drugim czynnikiem, który decyduje tutaj o poprawie dokładności lokalizacji jest przyjęcie średniej prędkości kie-



Rys. 2. Mapy błędu lokalizacji (wartość odchylenia standardowego) składowej Z dla poligonu badawczego przy uwzględnieniu tylko stanowisk podziemnych – wariant I; płaszczyzny cięcia przechodzą przez centralny obszar oddziału eksploatacyjnego

Fig. 2. Map of error location (standard deviation) of component Z in study site determined for underground stations only – variant I; cut planes go through center of exploitation panel



Rys. 3. Mapy błędu lokalizacji (wartość odchylenia standardowego) składowej Z dla poligonu badawczego przy uwzględnieniu stanowisk podziemnych, stanowisk w szybach oraz stanowisk powierzchniowych – wariant II; płaszczyzny cięcia przechodzą przez centralny obszar oddziału eksploatacyjnego

Fig. 3. Map of error location (standard deviation) of component Z in study site determined for underground stations, shaft stations and surface stations – variant II; cut planes go through center of exploitation panel

runkowej na stanowiska powierzchniowe wynoszącej odpowiednio 2700 m/s i 3500 m/s, co wyraźnie różni się od średnich prędkości dla stanowisk podziemnych wynoszących 5800 m/sek. W wariantie II rozmieszczenia sieci sejsmologicznej, uzyskano wystarczająco małe statystyczne błędy lokalizacji składowej pionowej, zdecydowanie poniżej 100 m.

Należy podkreślić, że wyznaczenie odchyłeń standardowych jest praktycznie jedną z nielicznych metod oceny wiarygodności i dokładności określania hipocentrum wstrząsu (w tym składowej pionowej). Jedynie wykonanie specjalnych strzelań kalibracyjnych może w pewnym zakresie również służyć weryfikacji błędu lokalizacji (Król 2007). Nie zawsze jednak miejsce strzelania pokrywa się z wstrząsem wywołanym tym strzelaniem, co może powodować pewne niejednoznaczności. Ponadto strzelania takie wykonywane są obecnie bardzo sporadycznie.

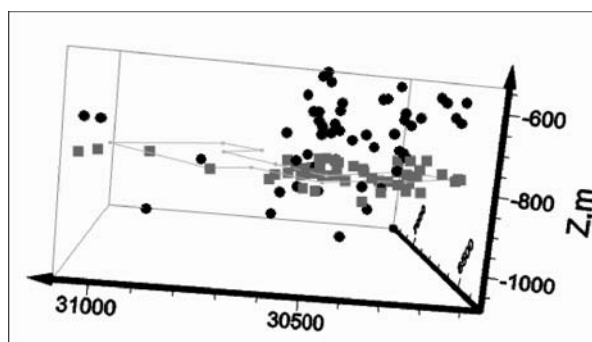
## **2. Przykładowe wyniki obliczeń składowej pionowej ognisk wstrząsów z użyciem specjalistycznego narzędzia do lokalizacji z uwzględnieniem prędkości stanowiskowych**

Dzięki zapisom cyfrowych sejsmogramów wstrząsów, które wystąpiły w rejonie oddziału na poligonie badawczym oraz przy wykorzystaniu algorytmów lokalizacji na podstawie pierwszych wejść fali P zmodyfikowanego programu MULTILOK można pokazać działanie odpowiednio skonfigurowanej sieci sejsmologicznej w praktyce. Aby można było uzyskać odpowiednią dokładność składowej Z, porównywalną do dokładności wyznaczania składowych X i Y, musi być spełniony warunek określonego przestrzennego rozmieszczenia stanowisk w badanym rejonie. Drugim, równie ważnym warunkiem jest uwzględnienie w algorytmach lokalizacyjnych średnich prędkości stanowiskowych, które odpowiadają ich usytuowaniu względem rejonów sejsmiczności.

Lokalizacji dokonywano dla dwóch wariantów sieci, opisanych szczegółowo w poprzednim rozdziale. Do praktycznych obliczeń lokalizacji użyto zapisy 51 wstrząsów, zarejestrowanych w rejonie oddziału eksploatacyjnego na wybranym poligonie badawczym w ZG Rudna.

Wyniki lokalizacji ognisk wstrząsów z poligonu badawczego, uzyskane tylko na podstawie stanowisk podziemnych (wariant I) oraz na podstawie stanowisk podziemnych, szybowych i dwóch powierzchniowych (wariant II), przedstawiono na kolejnych rysunkach.

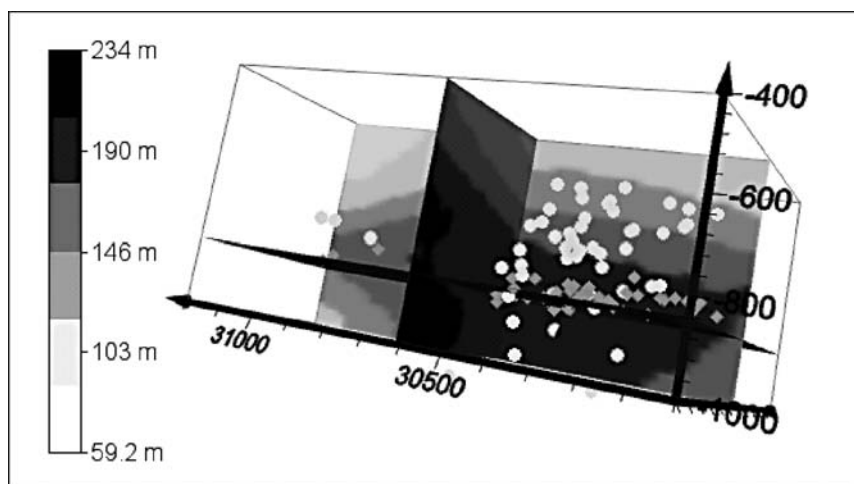
Wyniki obliczeń wskazały, że ogniska wstrząsów wyznaczone dla sieci „płaskiej”, lokalizowane były na głębokości zbliżonej do poziomu eksploatacji (rys. 4 – szare kwadraty – przeważnie między rzędną od -790 do -840). Ogniska wstrząsów wyznaczone dla sieci „przestrzennej”, lokalizowane były na różnych głębokościach powyżej poziomu eksploatacji i poniżej poziomu eksploatacji (czarne koła – przeważnie między rzędną -600 i -1000 m). Poglądowo różnice lokalizacji z sieci płaskiej (wariant I) i z sieci przestrzennej (wariant II) wyraźnie widoczne są na rysunkach 4–5. Różnica odległości w płaszczyźnie poziomej (XY) pomiędzy lokalizacją ognisk wstrząsów wyliczoną tylko ze stanowisk podziemnych (wariant I) oraz ze stanowisk podziemnych, szybowych i powierzchniowych (wariant II) wynosi przeciętnie kilkadziesiąt metrów (przeważnie 30–80 m). Różnica odległości w pionie jest natomiast zdecydowanie większa i najczęściej wynosi ponad 100 m, maksymalna zaobserwowana wyniosła 282 m. Można stąd wnioskować,



Rys. 4. Lokalizacja wstrząsów z uwzględnieniem stanowisk powierzchniowych i szybowych – wariant II (czarne koła) oraz tylko ze stanowisk podziemnych – wariant I (szare kwadraty)

Fig. 4. Location of seismic tremors using underground, shafts and surface stations – variant II (black circles) and underground stations only – variant I (grey squares)

że o ile współrzędne XY są w sieciach płaskich wyznaczane w miarę rozsądnie, to głębokości ognisk wstrząsów nie można obliczać przy wykorzystaniu płaskich sieci sejsmometrów. Na taki wynik wskazywały obliczenia średnich błędów lokalizacji składowej Z, wyznaczonych dla wariantu I i II. Dla wariantu I, czyli dla sieci płaskiej, średnie błędy lokalizacji składowej Z wynoszą 100–300 m, natomiast dla wariantu II, czyli sieci przestrzennej, średnie błędy lokalizacji składowej Z wynoszą tylko 30–70 m.



Rys. 5. Lokalizacja wstrząsów na tle mapy błędów lokalizacji składowej Z wyznaczonej dla sieci złożonej tylko z sejsmometrów podziemnych; szare kwadraty – lokalizacja tylko z stanowisk podziemnych (wariant I), jasno szare kółka – lokalizacja z stanowisk podziemnych, szybowych i powierzchniowych (wariant II)

Fig. 5. Location of seismic tremors on the background of errors coordinate Z location determined for underground stations only; grey squares – location of seismic tremors using underground stations only (variant I), light gray circles – location of seismic tremors using underground stations, shaft stations and surface stations (variant II)



Istotnym elementem analizy położenia ognisk wstrząsów lokalizowanych przestrzennie jest ich korelacja z mapami błędów lokalizacji składowej pionowej Z. Na rysunku 5 przedstawiono wstrząsy na tle mapy statystycznych błędów lokalizacji składowej Z, obliczonych dla „płaskiej” sieci sejsmometrów podziemnych – wariant I. Błędy te wynoszą około 200m w centralnej części oddziału eksploatacyjnego i faktyczna różnica między głębokością ognisk wyznaczoną z lokalizacji w „przestrzennej” sieci sejsmometrów (wariant II) a lokalizacji w „płaskiej” sieci sejsmometrów (wariant I), również mieści się w tym przedziale. Pojedyncze wstrząsy lokalizowały się również poniżej poziomu eksploatacji.

Należy nadmienić, że oprócz map błędów lokalizacji składowej Z, o bardzo wyraźnej przewadze lokalizacji „przestrzennej” nad „płaską”, świadczą również inne pośrednie analizy. Jeśli przyjmiemy, że w ognisku wstrząsu i w bliskim polu falowych występują procesy niszczenia skał i wyrobisk (Mutke 2007), to prawie wszystkie silne wstrząsy lokalizowane na głębokości eksploatacji jak to ma miejsce obecnie dla wariantu I, stanowiłyby źródło występowania skutków w wyrobiskach. Wiadomo jednak, że skutki takie wywołują tylko nieliczne wstrząsy. Przyglądając się lokalizacji ognisk wstrząsów w wariantcie sieci „przestrzennej” zauważamy, że ogniska wstrząsów w rzeczywistości są tam oddalone w pionie od wyrobisk górniczych i od rozciętych filarów. Tłumaczy to dlaczego większość silnych wstrząsów nie powoduje skutków w wyrobiskach eksploatacyjnych.

### Wnioski

Lokalizacja ognisk wstrząsów z uwzględnieniem pionowej składowej jest obecnie jednym z najważniejszych zadań geofizyki górniczej, od której zależą wyniki dalszych specjalistycznych analiz i prognoz zagrożenia sejsmicznego i zagrożenia tąpnięciami. W artykule przedstawiono sposób zwiększenia dokładności wyznaczania składowej pionowej hipocentrow wstrząsów w kopalniach podziemnych, uwzględniający dodanie stanowisk powierzchniowych i stanowisk w szybach kopalnianych (stworzenie sieci „przestrzennej”) oraz uwzględnienie w algorytmach obliczeniowych prędkości kierunkowych z obszaru aktywności sejsmicznej do stanowisk sejsmometrycznych. Zgodnie z wynikami obliczeń błędów lokalizacji dla sieci „przestrzennej”, uzyskano 4–5-krotne polepszenie dokładności wyznaczenia składowej pionowej ognisk wstrząsów, w porównaniu z lokalizacją przy użyciu tylko stanowisk podziemnych (sieć „płaska”).

Skonstruowanie specjalistycznego narzędzia informatycznego (program MULTILOK), pozwoliło na zastosowanie zaproponowanej metodyki w praktyce i umożliwiło przedstawienie różnic w lokalizacji składowej pionowej ognisk wstrząsów, dla wybranych zjawisk sejsmicznych zarejestrowanych przez kopalnianą sieć sejsmologiczną. Analiza wyników lokalizacji hipocentrow w aspekcie wyznaczania składowej pionowej dowodzi, że do praktycznego stosowania można wykorzystywać metodę lokalizacji opartą na czasach pierwszych wejść fali P, przy wykorzystaniu sieci „przestrzennej” oraz wyznaczeniu prędkości kierunkowych na stanowiska powierzchniowe i szybowe.



W celu dokonania pogładowej i ilościowej oceny błędów lokalizacji składowej pionowej Z, które mogą powstać przy lokalizacji wstrząsów, przedstawiono mapy tych błędów oraz naniesione lokalizacje ognisk wstrząsów dla wariantu I i wariantu II. Dzięki temu uzyskano przestrzenną ocenę błędów lokalizacji składowej Z. Błąd lokalizacji składowej pionowej dla wariantu II (stanowiska podziemne i dodatkowo stanowiska w szybach oraz dwa stanowiska powierzchniowe) nie przekraczał 100 m i jest porównywalny do dokładności lokalizacji w płaszczyźnie poziomej.

#### LITERATURA

- Bjork A., Dahlquist G., 1987 – Metody numeryczne. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa .
- Dryja M., Jankowska J., Jankowski M., 1988 – Przegląd metod i algorytmów numerycznych. WNT, Warszawa.
- Dubiński J., Lurka A., Mutke G., 2004 – Optymalizacja sieci sejsmologicznych – doświadczenia i problemy. Mat. Symp. Tapania' 2004, Wyd. GIG, s. 85–100.
- Drzęźła B., 1994 – Zasady projektowania konfiguracji sieci sejsmometrów. Prz. Gór. t. 50, nr 11, s. 1–6.
- Findeisen W., Szymanowski J., Wierzbicki A., 1977 – Teoria i metody obliczeniowe optymalizacji. PWN, Warszawa.
- Gibowicz J., Kijko A., 1994 – An Introduction to Mining Seismology. Academic Press, San Diego, New York, Boston, London, Tokyo, Toronto.
- Król M., 2008 – Próba określenia głębokości wstrząsów górniczych w kopalni rudy miedzi „Polkowice-Sieroszowice”. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie. No 3 (163).
- Lurka A., Mutke G. i Mirek A., 1997 – Lokalizacja ognisk wstrząsów z uwzględnieniem zjawiska wieloznaczności. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie, nr 9.
- Lurka A., 1996 – A certain new method for seismic network optimization and its consequences. Acta Montana, 10, Praga.
- Lurka 2000 – Analiza błędów lokalizacji ognisk wstrząsów górniczych z wykorzystaniem funkcji uwikłanych”. Praca doktorska, GIG, Katowice.
- Lurka A., Logiewa H., 2007 – Sejsmologiczny System Obserwacji SOS jako nowe narzędzie do obserwacji i interpretacji danych sejsmicznych w górnictwie zagrożonym tapaniami. Prace Naukowe GIG, Górnictwo i Środowisko 3, s. 283–296.
- Marcak H., Zuberek W.M., 1994 – Geofizyka Górnicza. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice.
- Mutke G., 2007 – Ocena zagrożenia tapaniami w kopalniach podziemnych uwzględniająca parametry drgań blisko ognisk wstrząsów – doświadczenia z polskich kopalń. Górnictwo i Geoinżynieria. Kwartalnik AGH. r. 31, z. 3/1, s. 439–450.
- Press W.H., Flannery B.P., Teukolsky S.A. and Vetterling W.T., 1990 – Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing. Cambridge University Press, New York.
- Smirnow N.W., Dunin-Barkowski W., ROK – Kurs rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej dla zastosowań technicznych”. PWN, Warszawa.

#### POPRAWA DOKŁADNOŚCI LOKALIZACJI SKŁADOWEJ PIONOWEJ HIPOCENTRÓW WSTRZĄSÓW GÓRNICZYCH

#### Słowa kluczowe

Wstrząs górotworu, lokalizacja 3D, sieć sejsmologiczna, hipocentrum, zagrożenie

## Streszczenie

Lokalizacja hipocentrow ognisk wstrząsów górniczych ma zasadnicze znaczenie dla wiarygodnej oceny zagrożenia sejsmicznego i zagrożenia tąpnięciem. Odległość ogniska wstrząsu od czynnych frontów eksploatacji oraz wartość jego momentu sejsmicznego decyduje o stateczności wyrobisk górniczych i bezpieczeństwie załogi. Niebezpieczne, wysokie naprężenia wywołane zjawiskami dynamicznymi, mają bowiem miejsce tylko w strefie tzw. bliskiego i pośredniego pala falowego (Mutke 2007).

Sieci sejsmologiczne w polskich kopalniach węgla i rud miedzi są z reguły sieciami o płaskim rozmieszczeniu stanowisk sejsmometrycznych, co skutkuje poprawną lokalizacją ogniska wstrząsu w płaszczyźnie X-Y, natomiast uniemożliwia wiarygodną lokalizację składowej pionowej Z. W artykule przedstawiono sposób lokalizacji składowej pionowej hipocentrow z dostateczną dokładnością, pod warunkiem odpowiedniego doboru geometrii stanowisk sejsmometrycznych, czyli stworzenia sieci przestrzennej. W takim ujęciu, równie ważnym warunkiem jest uwzględnienie w algorytmach lokalizacyjnych średnich prędkości kierunkowych na poszczególne stanowiska sejsmometryczne. Dokonano weryfikacji lokalizacji składowej pionowej hipocentrow wstrząsów w oparciu o analizę błędów lokalizacji (wartość odchylenia standardowego składowej Z). W efekcie zmiany konfiguracji sieci sejsmologicznej i wprowadzenia prędkości kierunkowych w procedurze obliczeniowej, uzyskano lokalizacje składowej pionowej z błędem porównywalnym do lokalizacji w poziomie, tj. poniżej 100 metrów.

## IMPROVEMENT OF VERTICAL COMPONENT LOCATION OF SEISMIC EVENTS IN UNDERGROUND MINES

## Key words

Mining tremor, three-dimensional location, seismic network, hypocenter, seismic hazard

## Abstract

Location of seismic events is the first step to study seismicity in mines. Hypocenter location of mining tremors has fundamental meaning for credible evaluation of seismic and rockburst hazard. It is well known, that the distance from tremor source to openings and the size of seismic moment is crucial from various types of underground damage and safety point of view. Dangerous, high dynamic stresses and underground seismic hazards occur in near field wave only (Mutke 2007).

Seismic networks in Polish copper and coal mines consist of seismometers located in one horizontal level and in this case correct location of seismic events in coordinates X, Y plane is possible. In such conditions good location in vertical direction Z is not possible. In the paper the way of hypocenter location of mining tremors with good accuracy is presented. The first condition to do it, is match receivers up to optimal geometry, it means to create three-dimensional seismic network. The second condition is to use average directional wave velocity for every receiver in location algorithm. The hypocenters location was based on P-wave's first arrival time and modified Powell algorithm. The presented calculations were conducted in field site in Rudna copper mine. The seismic network consisted of twenty seven underground receivers installed in exploitation level, five receivers installed in the shafts on the level between mining openings and surface and two receivers on the surface (three-dimensional seismic network). The maps of error location (standard deviation of Z component) for three-dimensional and two-dimensional networks were performed. Hypocenters of fifty one seismic tremors were calculated using two-dimensional network configuration and three-dimensional network configuration. Z components of all located seismic events were correlated with location error of Z coordinate for two-dimensional and three-dimensional seismic networks. Application of three-dimensional seismic network and directional velocities decreased of Z component error location 4–5 times, to the values comparable with error location for horizontal components (less than 100 m). Three-dimensional location clearly showed that the most of hypocenters occurred from 100 m to 250 m above level of exploitation. Only a few seismic events were located on the exploitation level. For two-dimensional seismic network all hypocenters were located in vicinity of exploitation level. Better hypocenters location is very important and necessary to improve safety in mines with high seismicity. Method presented in the paper is very useful and can be put into practice in underground mines.