

Izabela JAŚKIEWICZ-PROC  
KGHM CUPRUM, Wrocław

## **Porównanie prognozowanych i zarejestrowanych parametrów drgań od wstrząsów górniczych w bliskich odległościach epicentralnych na terenie LGOM**

### **Słowa kluczowe**

Wstrząsy sejsmiczne, parametry drgań

### **Streszczenie**

Dotychczasowe analizy drgań wykazują, że dla zabudowy terenu decydujące znaczenie mają drgania, które pochodzą od wstrząsów o wysokich energiach sejsmicznych, są w bliskich odległościach od zjawiska i mają długie czasy trwania. Zjawiska takie powodują silne oddziaływanie na powierzchnię terenu i mogą być skutkiem ewentualnych uszkodzeń obiektów budowlanych. Na podstawie opracowanych zależności empirycznych w bliskich odległościach od źródła wstrząsu szacowane parametry drgań są z reguły niższe od wartości rejestrowanych. Wraz ze zwiększającą się odległością zjawiska od epicentrum, funkcje szacowane wykazują dobre dopasowanie do rejestrowanych parametrów drgań.

Celem niniejszego referatu jest pokazanie różnic w parametrach drgań rejestrowanych na powierzchni terenu oraz szacowanych parametrach drgań w bliskich odległościach od wstrząsów sejsmicznych. W analizach wykorzystano dane rejestracyjne ze stanowisk pomiarowych na obszarze górniczym kopalni Rudna.

### **1. Wstęp**

W Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym (LGOM) eksploatacja odbywa się w dużej mierze pod obszarem zabudowanym. Oddziaływanie dynamiczne wstrząsów sejsmicznych na zabudowę kubaturową jest jednym z istotnych elementów w problematyce ochrony powierzchni. Prowadzone pomiary drgań na gruncie, które generowane są wstrząsami sejsmicznymi, stanowią podstawowy materiał do dalszych analiz dynamicznych wpływów drgań na budynki i analizy ich propagacji. Obok bieżącej rejestracji zjawisk wykorzystuje się prognozowanie statystyczne, które ocenia rozprzestrzenianie się wpływów dynamicznych na powierzchnię terenu. W pracy przedstawiono problemy szacowania wartości drgań w bliskich odległościach od epicentrum.

## 2. Prowadzenie monitoringu sejsmicznego

W kopalniach zagłębia miedziowego na powierzchni terenu prowadzony jest ciągły monitoring sejsmiczny na wytypowanych do obserwacji powierzchniowych stanowiskach sejsmicznych. Celem monitoringu sejsmicznego jest rejestracja rzeczywistych przebiegów drgań wywołanych wstrząsem górniczym i na jego podstawie ocena skutków oddziaływania drgań według obowiązujących norm i skal sejsmicznych.

Pomiary drgań wykonuje się w punktach pomiarowych, które są rozmieszczone na terenie całego obszaru górniczego, ze szczególnym uwzględnieniem miejsc, w obrębie których prowadzona jest eksploatacja górnicza. Obserwacje drgań powierzchni prowadzone są za pomocą cyfrowych systemów rejestracyjnych przy wykorzystaniu czujników przyspieszenia drgań stanowiących zintegrowany czujnik trójskładowy. Czujniki drgań zamontowane są na poziomie gruntu, zespolone na sztywno ze specjalnie zabudowanym postumentem na powierzchni terenu. Aktualnie dla ZG Rudna rejestracja drgań prowadzona jest na 9 stanowiskach, które zlokalizowane są na obszarach zabudowy wiejskiej oraz 5 stanowiskach w obrębie miasta Polkowice (KGHM CUPRUM 2008-2010).

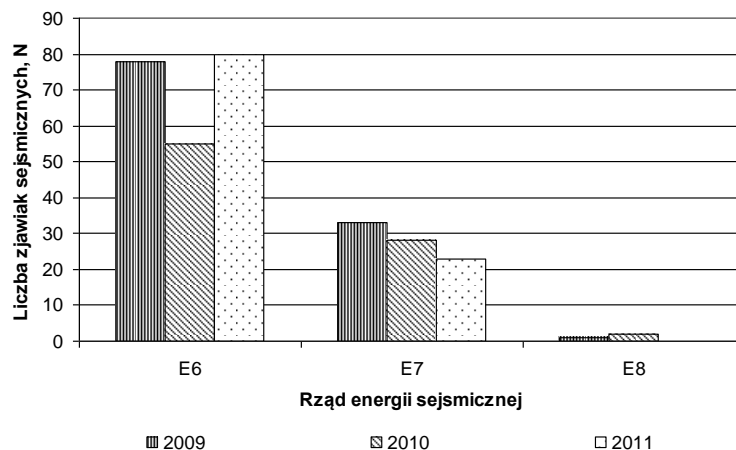
## 3. Analizy zbioru danych pomiarowych

### 3.1. Charakterystyka wstrząsów górniczych

Zbiór zapisów wstrząsów sejsmicznych, który wykorzystano w analizach poszczególnych rejestracji, obejmował trzyletnią aktywność sejsmiczną na terenie ZG Rudna w latach 2009 - 2011. W analizowanym okresie zarejestrowano w kopalnianych stacjach sejsmicznych 300 wstrząsów sejsmicznych powyżej  $10^6$  J, z czego:

- 213 zjawiska o energii sejsmicznej rzędu  $10^6$  J,
- 84 zjawiska o energii sejsmicznej rzędu  $10^7$  J,
- 3 zjawiska o energii sejsmicznej rzędu  $10^8$  J.

Na histogramie (rys.3.1) pokazano rozkład wstrząsów górniczych o energiach rzędu  $10^6$ ,  $10^7$  i  $10^8$  J zaistniałych w poszczególnych latach (KGHM CUPRUM 2008-2010 ).

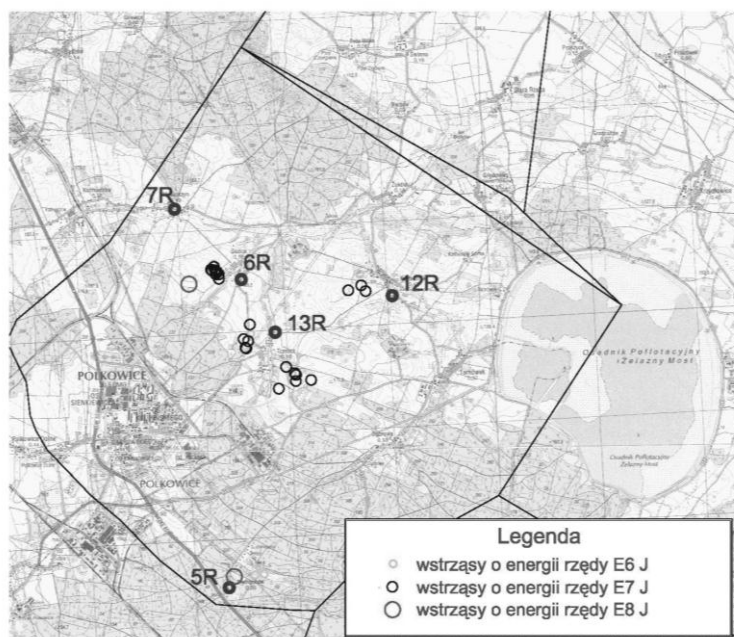


**Rys. 3.1.** Rozkład aktywności sejsmicznej od energii  $1,0 \cdot 10^6$  J w latach 2009-2011 na obszarze ZG Rudna

**Fig. 3.1.** Seismic activity distribution from energy  $1,0 \cdot 10^6$  J in the years 2009-2011 in the Rudna mine

### 3.2. Charakterystyka wybranych parametrów drgań

Rejestracje wpływów dynamicznych opracowuje się zgodnie z procedurami aktualnie obowiązującej instrukcji (Dubieński, Jaśkiewicz., Lurka, Mutke 2006). W ocenie wstrząsów sejsmicznych na grunt wykorzystuje się wiele parametrów tj. amplitudę przyspieszenia drgań poziomych  $PGA_{H10}$  [ $mm/s^2$ ], amplitudę prędkości drgań poziomych  $PGV_{Hmax}$  [ $mm/s$ ], maksymalny czas trwania drgań składowej poziomej  $t_{Ha}$  i  $t_{Hv}$  [s] i częstotliwość drgań  $f$  [Hz] (częstotliwość dominującej fazy przyspieszenia drgań określoną dla okna czasowego, wyznaczonego wg czasu trwania drgań zjawiska dla składowych poziomych). Z pomiarów empirycznych rejestracji drgań na powierzchni terenu ZG Rudna otrzymano liczny zbiór danych z wyznaczonymi parametrami wg skali GSI-2004. Wśród zgromadzonego zbioru danych wybrano 39 rejestracji, których źródło drgań znajdowało się w bliskiej odległości epicentralnej (do 1400 metrów). Na kolejnym rysunku (rys. 3.2) przedstawiono rozkład wybranych wstrząsów górniczych wraz ze stanowiskami sejsmicznymi, które rejestrowały drgania, a ich parametry wykorzystano w dalszych analizach.



**Rys. 3.2.** Rozkład wybranych wstrząsów sejsmicznych wraz z lokalizacją najbliższych stanowisk pomiarowych na obszarze ZG Rudna

**Fig. 3.2.** Selecting distribution of mining tremors and location of the nearest seismic stations in the Rudna mine

W wybranym zbiorze drgań znalazły się rejestracje pochodzące od wstrząsów sejsmicznych z analizowanych trzech grup energetycznych:

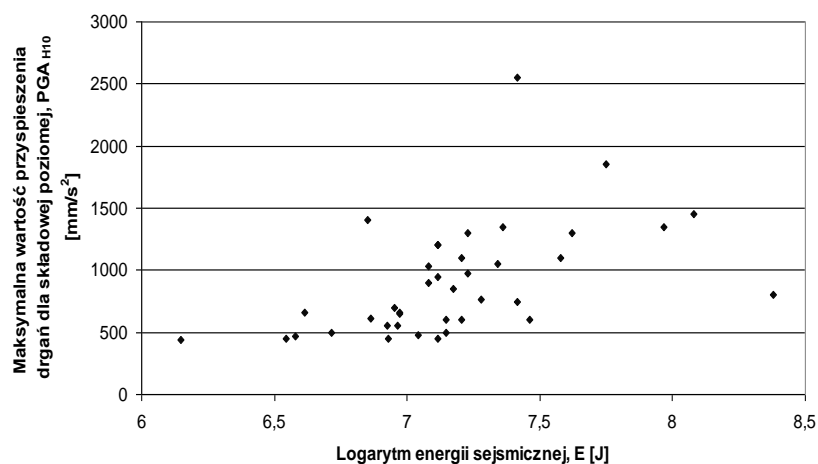
- 13 zjawisk o energii sejsmicznej rzędu  $10^6$  J,
- 24 zjawiska o energii sejsmicznej rzędu  $10^7$  J,
- 2 zjawiska o energii sejsmicznej rzędu  $10^8$  J.

Charakterystyczną cechą wybranego zbioru jest to, że prowadzone rejestracje drgań gruntu położone są w bliskim polu falowym. W pomiarach dołowych strefa ta charakteryzuje się bardzo dużym spadkiem amplitudy drgań z odległością do 1000 razy większą, niż w polu dalekim (Mutke 2007), co nie jest całkowicie adekwatne do pomiarów drgań na powierzchni terenu. Wiadomym jest, że w strefie epicentralnej dominują fale bezpośrednie, które charakteryzują się wysokimi wartościami przyspieszenia drgań dla stosunkowo wysokich częstotliwości. Powierzchniowe rejestracje drgań blisko epicentrum charakteryzują się dużą zmiennością amplitudy przyspieszenia drgań oraz stosunkowo niskimi parametrami czasu trwania drgań (Mutke, Tatar 2009).

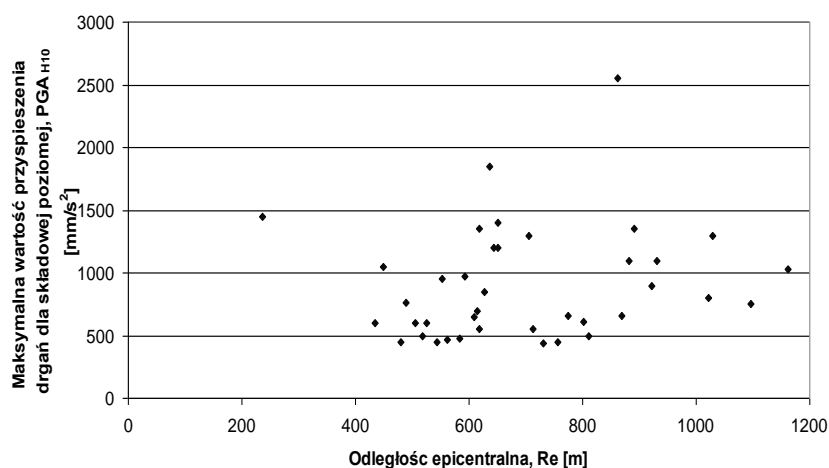
Dla pokazania skali problemu przedstawiono wykresy (rys. 3.3 – 3.5) z rozkładami parametru przyspieszenia drgań w zależności od poszczególnych wielkości.

Wielkość przyspieszenia drgań zmienia się w granicach  $440 - 2550$  mm/s<sup>2</sup>, w tym 14 zjawisk jest powyżej  $1000$  mm/s<sup>2</sup>. Maksymalny czas trwania drgań wybranego zbioru zmienia się od 0,8 do 3,4 s. Można zauważyć, że drgania, które rejestrowano w odległościach bliskich epicentrum, są niezależne od wielkości energii sejsmicznej, jaką emituje górotwór. Na podstawie rozkładów dla wyselekcjonowanych parametrów fizycznych, jakie są rejestrowane podczas trwania wstrząsu, widać słabe korelacje pomiędzy wielkościami. Widoczne są duże rozrzuty

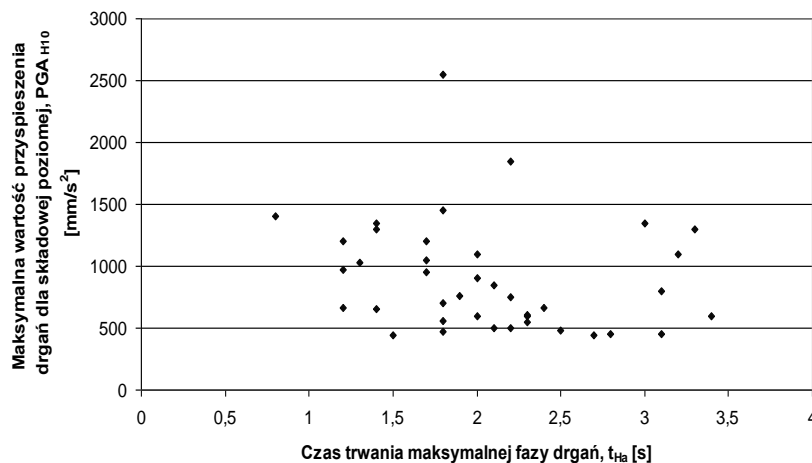
parametrów. Wielkości przyspieszenia drgań, w zależności od energii sejsmicznej, odległości epicentralnej i czasu trwania drgań, tworzą zbiór rozproszony, układający się w chmurę. Takie rozkłady znacznie utrudniają dopasowanie zależności empirycznej. Proste analizy wielkości przyspieszenia, które zostały wykonane w bliskim polu falowym, wykazały skomplikowany obraz rozkładu parametrów drgań.



Rys. 3.3. Wykres wartości przyspieszenia drgań i energii sejsmicznej  
Fig. 3.3. Acceleration value plotted versus seismic energy



Rys. 3.4. Wykres wartości przyspieszenia drgań i odległości epicentralnej  
Fig. 3.4. Acceleration value plotted versus epicenter distance



Rys. 3.5. Wykres wartości przyspieszenia drgań i czas trwania drgań  
 Fig. 3.5. Acceleration value plotted versus duration of ground motion

### 3.3. Porównanie prognoz z rzeczywistymi parametrami drgań

W celu szacowania parametrów drgań w miejscach, gdzie nie ma czujników, wykorzystuje się lokalne zależności statystyczne rozprzestrzeniania się przyspieszenia, prędkości i czasu trwania na powierzchni terenu. Wielkości były opracowane na podstawie zbioru danych, których parametr energii sejsmicznej zmieniał się od  $10^6$  do  $10^9$  J, a rejestracje były prowadzone w odległościach od 300 do 6000 metrów (KGHM CUPRUM 2007). W niniejszym referacie skupiono się na jednym z rejestrowanych parametrów – przyspieszeniu drgań. Maksymalne przyspieszenie drgań poziomych dla czasu trwania drgań do 4 s wyznacza się w oparciu o zależność:

$$PGA_{H10} = 11,1 \cdot E^{0,3729} \cdot R_e^{-0,4164} \cdot \tau^{-0,3911} \quad (3.1)$$

gdzie:

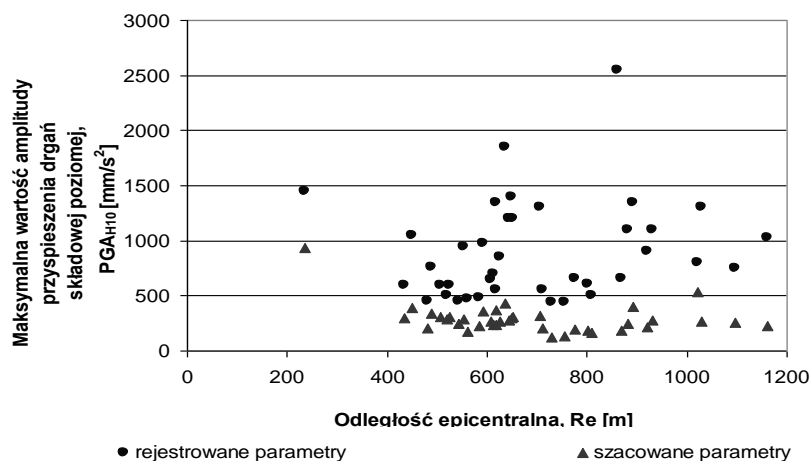
$PGA_{H10}$  - maksymalna wypadkowa amplituda drgań składowej poziomej w paśmie częstotliwości do 10 Hz [ $mm/s^2$ ]

$E$  - lokalna energia sejsmiczna [J],

$R_e$  - odległość epicentralna [m],

$\tau$  - czas trwania maksymalnej fazy drgań [s].

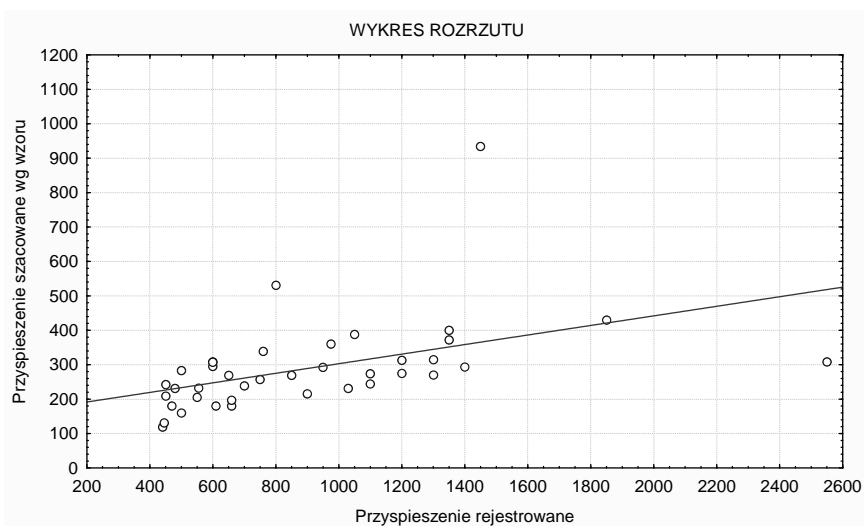
Dla pokazania problemu prognozy wpływów dynamicznych na rys. 3.6 przedstawiono rozkład rejestrowanych parametrów drgań na powierzchniowych stanowiskach sejsmicznych wraz ze średnią wielkością drgań szacowaną według obowiązującej zależności empirycznej. Należy zwrócić uwagę na występujące rozbieżności pomiędzy rejestrowanymi wielkościami parametru przyspieszenia drgań, które nie wpisują się w typowe rozkłady statystyczne, a wielkościami estymowanymi według wzoru (3.1).



**Rys. 3.6.** Rozkłady zarejestrowanych i szacowanych wielkości przyspieszenia drgań na powierzchniowych stanowiskach pomiarowych na terenie ZG Rudna

**Fig. 3.6.** The recorded and estimated distribution of acceleration values on the surface stations in the Rudna mine

Zarejestrowane parametry w bliskim polu falowym przysparzają trudności w interpretacji wyników i nie podlegają ocenie statystycznej. Dla potwierdzenia tej tezy przedstawiono wykres rozrzutu parametru przyspieszenia drgań (rys. 3.7). Na osi x-owej umieszczono rejestrowane parametry przyspieszenia, a na osi y-owej – parametry szacowane według zależności empirycznej. Parametry dobrze skorelowane powinny układać się ściśle wzdłuż prostej.



**Rys. 3.7.** Wykres rozrzutu parametru wyznaczonego według wzoru względem parametru wyznaczonego według rejestracji

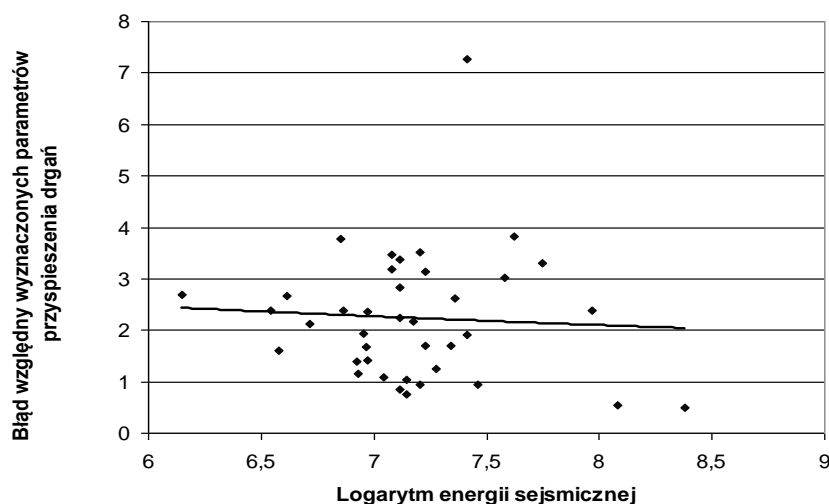
**Fig. 3.7.** Plot of dispersion recorded parameters and estimated parameters

Parametr przyspieszenia wyznaczony według wzoru jest „niedoszacowany”. Amplitudy parametrów wyznaczone z rejestracji składowych poziomych zmieniają się od 440 do 2550 mm/s<sup>2</sup>. Natomiast parametry wyznaczone według wzorów osiągają wartości od 119 do 934 mm/s<sup>2</sup>.

„Siłę” współzależności dwóch zmiennych można wyrazić liczbowo za pomocą wielu mierników. Najbardziej popularny jest współczynnik korelacji liniowej Pearsona, oznaczony symbolem  $r_{XY}$ , przyjmujący wartości z przedziału [-1, 1]. Współczynnik korelacji Pearsona wyliczamy wówczas, gdy obie zmienne są mierzalne i mają rozkład zbliżony do normalnego, a zależność jest prostoliniowa (Kłonecki 1999; Koronacki, Mielniczuk 2001). Na podstawie wybranego zbioru danych współczynnik Pearsona osiąga wartość 0,46. Kwadrat współczynnika korelacji, nazywany współczynnikiem determinacji  $r_{XY}^2$ , informuje jaka część zmiennej losowej została wyjaśniona przez zmienną objaśniającą. Dla wybranego zbioru danych współczynnik ten wynosi 0,21. Obliczona wartość współczynnika determinacji wskazuje, że dla zbioru w bliskim położeniu od epicentrum tylko 21% danych jest objaśniana przez parametr wyznaczony na podstawie wzoru. Dla porównania dla całego zbioru danych z lat 2009-2011 współczynniki te wynoszą odpowiednio:  $r_{XY} = 0,71$  i  $r_{XY}^2 = 50\%$ .

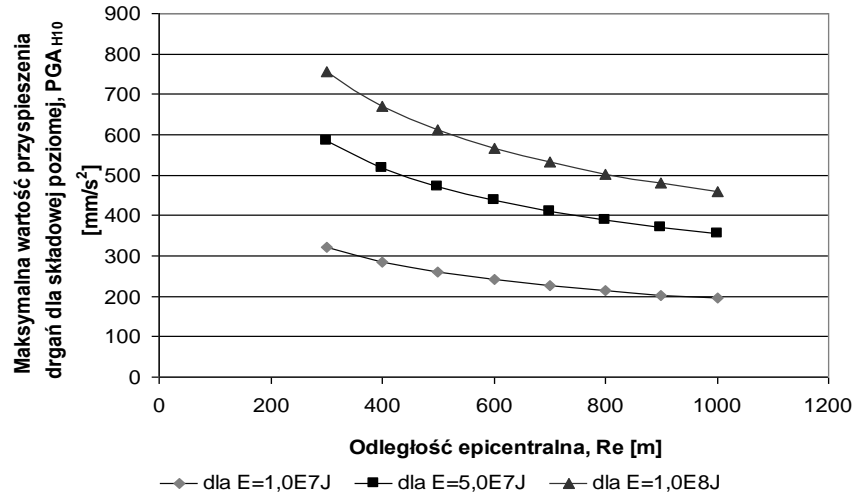
Amplitudy przyspieszenia z pomiarów drgań na powierzchni terenu są dużo większe, niż parametry prognozowane na podstawie wzorów empirycznych. Dla analizowanego parametru wyznaczono błąd względny, a następnie spróbowano skorelować go z energią sejsmiczną (rys. 3.8).

Z wykresu można odczytać, że największe błędy względne występują wtedy, gdy energia sejsmiczna osiąga wartość rzędu  $10^7$  J. Na podstawie tej niewielkiej próby parametrów drgań wyznaczonych blisko epicentrum, można zauważyć z linii trendu, że wzrost energii sejsmicznej powoduje mniejsze błędy pomiędzy parametrami mierzonymi, a wyznaczanymi według wzorów statystycznych.



Rys. 3.8. Rozkład logarytmu energii sejsmicznej w porównaniu z błędem względnym  
Fig. 3.8. Distribution of logarithm seismic energy and relative error





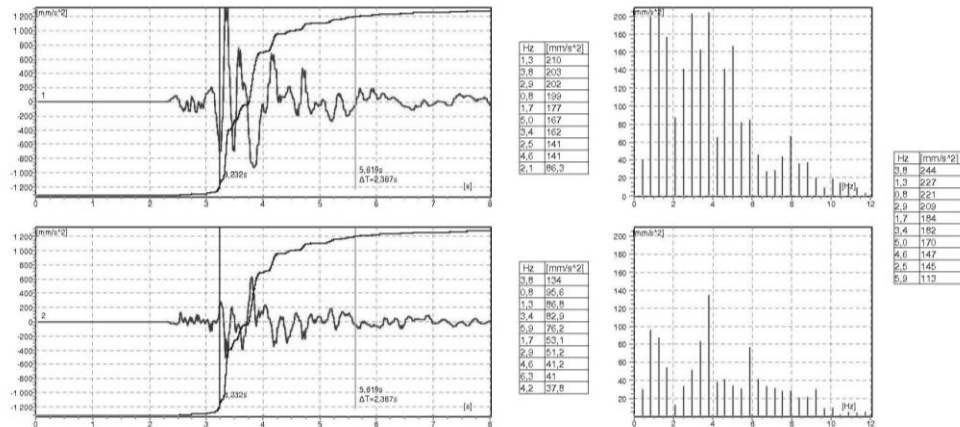
**Rys.3.9.** Rozkład wielkości przyspieszenia drgań na powierzchni terenu dla określonego czasu trwania drgań 2 s i dla wybranych energii sejsmicznych  
**Fig. 3.9.** The estimated distribution of acceleration values on the surface area for particular duration of the ground motion 2 s and selected seismic energy

Parametr energii sejsmicznej, który wyznaczany jest przez stacje geofizyki górniczej w poszczególnych kopalniach, generalnie ma istotny wpływ na parametry drgań szacowane na powierzchni terenu. Chcąc pokazać, jak zmieniają się wielkości przyspieszenia drgań w zależności od wielkości energii sejsmicznej, przedstawiono na rys. 3.9 wykresy rozkładu z podziałem na energię sejsmiczną:  $1,0 \cdot 10^7$  J,  $5,0 \cdot 10^7$  J i  $1,0 \cdot 10^8$  J. Przedstawiono funkcję przyspieszenia drgań w zależności od odległości epicentralnej (od 300 do 1000 m) dla przykładowego czasu trwania maksymalnej fazy drgań równego 2 sekundy. Wartości przyspieszenia drgań zostały wyznaczone w oparciu o obowiązującą zależność statystyczną.

Zmiana wielkości rzędu energii sejsmicznej w bliskich odległościach epicentralnych odzwierciedla duże zmiany przyspieszenia. Można przypuszczać, że znaczącą rolę odgrywa sama precyzja i dokładność w określaniu energii sejsmicznej. Do prawidłowego wyznaczenia energii sejsmicznej wymagane są pewne założenia i uproszczenia. Wielkość energii sejsmicznej zależy również od sposobu posadowienia czujnika drgań w kopalni (Mutke 2007).

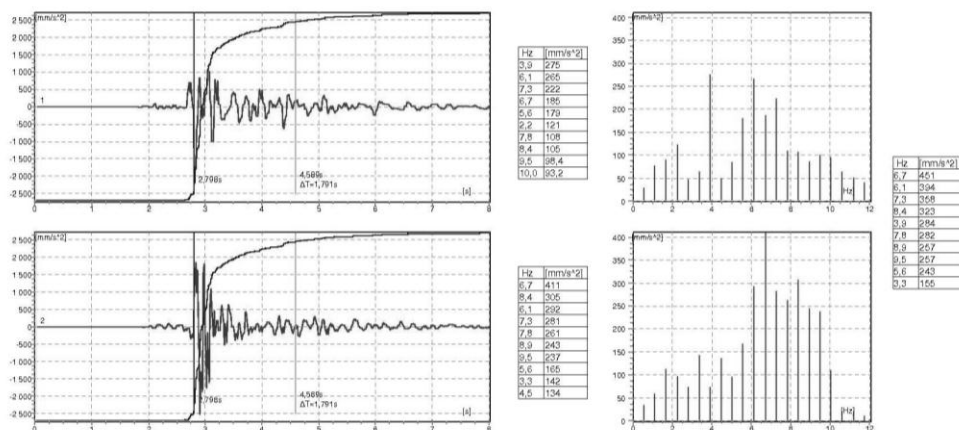
## 5. Poszczególne rejestracje wstrząsów

Na rys. 3.10 i 3.11 przedstawiono przykładowe przebiegi składowych poziomych przyspieszenia drgań – odpowiednio X i Y, które znajdują się w zbiorze wybranych rejestracji. Pojedyncze przebiegi poddano filtracji w paśmie 0,5-10,0 Hz. Zarówno zjawiska o wysokich energiach sejsmicznych rzędu  $10^8$  J, jak i zjawiska o rząd niższe ( $10^7$  J) przekraczają wartość przyspieszenia wypadkowego 1000 mm/s<sup>2</sup>.



**Rys. 3.10.** Wstrząs o energii  $1,2 \cdot 10^8$  J zarejestrowany na stanowisku pomiarowym Biedrzychowa w dniu 20-02-2010 w polu G-7/5 w odległości epicentralnej 239 m (1 – składowa X, 2 – składowa Y)  
**Fig.3.10.** Mining tremor of seismic energy  $1,2 \cdot 10^8$  J recorded in seismic station Biedrzychowa in 20-02-2010 on the field G-7/5 at epicenter distance 239 m (1 – X-coordinate, 2 – Y-coordinate)

Porównując wykresy drgań rejestracji z powierzchni gruntu można zauważyć, że wartość czasu trwania maksymalnej fazy drgań  $t_{Ha}$  na wszystkich rejestracjach jest bardzo krótki, co jest charakterystyczne dla wstrząsów górniczych, jakie mają miejsce w bliskich odległościach epicentralnych. Takie krótkotrwałe zjawiska generalnie nie są w stanie wywołać silnej reakcji budynku (Mutke, Tataro 2009). Ruch podłoża stanowi wymuszenie kinematyczne i ma charakter przestrzenny. Na rysunkach powyżej pokazano rejestracje w kierunkach poziomych – oś X i Y zgodnie z instrukcją prowadzenia pomiarów (Dubiński, Jaśkiewicz., Lurka, Mutke 2006). Ruchy drgań w dwóch płaszczyznach są różnorodne, nie można wyróżnić dominującego kierunku. Na przedstawionych rejestracjach widoczny jest udział większych częstotliwości, co charakteryzuje drgania mierzone w bliskich odległościach epicentralnych. Cechą wspólną, jaka charakteryzuje rejestracje w bliskim polu falowym, są duże amplitudy, które często przekraczają wartość  $1000 \text{ mm/s}^2$ , niezależnie od wielkości energii sejsmicznej zjawiska. Wstrząsy mają charakter impulsu – pojedynczego piku, który w ułamkach sekundy osiąga bardzo dużą wartość, po czym szybko zanika.



**Rys. 3.11.** Wstrząs o energii  $2,6 \cdot 10^7$  J zarejestrowany na stanowisku pomiarowym Komorniki w dniu 05-10-2011 w polu XX/1 w odległości epicentralnej 862 m (1 – składowa X, 2 - składowa Y)

**Fig. 3.11.** Mining tremor of seismic energy  $2,6 \cdot 10^7$  J recorded in seismic station Komorniki in 05-10-2011 on the field XX/1 at epicenter distance 862 m (1 – X-coordinate, 2 – Y-coordinate)

## 5. Podsumowanie

Przedstawione analizy na wybranej liczbie danych pokazały problem, jaki wiąże się z prognozowaniem wpływów dynamicznych w bliskich odległościach epicentralnych. Stosowanie opracowanych statystycznych wzorów na podstawie empirycznych danych niesie ze sobą ryzyko popełnienia poważnego błędu. W bliskich odległościach od epicentrum bardzo trudno jest określić wielkości dynamiczne na podstawie zależności statystycznych, jakie zachodzą na powierzchni terenu. Dlatego najważniejsza jest ciągła obserwacja samego górotworu, jak i rejestracja parametrów w powierzchniowych stacjach pomiarowych. Rzeczywiste pomiary drgań prowadzone na gruncie dają szeroki zakres informacji samego zjawiska, w postaci akceleroqramu, jak i wyznaczonych parametrów drgań opisujących dynamikę zjawiska.

## Literatura

- [1] Dubiński J., Jaśkiewicz K., Lurka A., Mutke G. 2006: Instrukcja prowadzenia powierzchniowych pomiarów sejsmometrycznych, interpretacji wyników oraz oceny i prognozowania drgań sejsmicznych od wywołanych wstrząsami górnictwymi na powierzchni terenu w LGOM w oparciu o skalę GSI-2004
- [2] KGHM CUPRUM 2007: Analiza parametrów drgań obliczanych metodą wzorów empirycznych w porównaniu z wielkościami rejestrowanymi w rzeczywistości na terenie LGOM, Wrocław
- [3] KGHM CUPRUM 2008-2010: Opracowanie wyników drgań z powierzchniowej sieci sejsmicznej dla stanowisk typu WORS rozlokowanych na terenie górnictwem Rudna wraz z analizą oddziaływań dynamicznych na lata 2008-2010, Wrocław
- [4] Klonecki W. 1999: Statystyka dla inżynierów, Wydawnictwo Naukowe PWN, Wrocław
- [5] Koronacki J., Mielniczuk J. 2001: Statystyka dla studentów kierunków technicznych i przyrodniczych, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa

- [6] Mutke G. 2007: Charakterystyka drgań wywołanych wstrząsami górniczymi w odległościach bliskich źródła sejsmicznego w aspekcie oceny zagrożenia tąpnięciem, Katowice
- [7] Mutke G., Tatara T. 2009:Górnictwo Skale Intensywności Drgań GSI i doświadczenia z ich stosowania, Katowice

### **Comparison of forecasting and registered tremble parameters of mining tremors near epicenter distance in the LGOM area**

#### Key words

mining tremors, vibration parameters

#### Summary

Current analyses of the tremble show that for surface infrastructure a great significance has trembles, which derives from tremors of high seismic energy, near epicenter distances and long duration of ground motion. These occurrences contribute a strong action on the surface area and they can be an effect of potential building damage. Based on studied the empirical formulas near epicenter distance from source of tremor, the parameters of trembles are lower than registration values. As the distance increases from epicenter of occurrences the estimated formulas have better approximation. The aim of this paper was shown differences between vibrations' records and estimated parameters near epicenter distance. The analysis makes use of seismological observations recorded in the seismic station ZG Rudna mine.

*Przekazano: 30 marca 2012 r.*