

Piotr BAŃKA, Andrzej JAWORSKI  
Politechnika Śląska, Gliwice

## OKREŚLANIE PARAMETRÓW DRGAŃ GRUNTU GENEROWANYCH WSTRZĄSAMI GÓRNICZYMI

**Streszczenie.** Omówiono wybrane aspekty szacowania wielkości drgań powierzchni wywoływanych wstrząsami indukowanymi eksploatacją górnictwem. Przedyskutowano problemy związane z odtwarzaniem pól przyspieszeń drgań gruntu w oparciu o punktowe rejestracje prowadzone w zagrożonych sejsmicznie rejonach. Przedstawiono próbę wykorzystania tych rejestracji do tworzenia zależności regresyjnych, umożliwiających prognozowanie poziomu drgań gruntu. Wyniki skonfrontowano z powszechnie stosowanymi zależnościami wiążącymi sejsmiczność z amplitudami przyspieszeń drgań powierzchni. Scharakteryzowano podstawowe źródła, niejednokrotnie dużych, błędów wykonywanych oszacowań.

## ASSESSMENT OF PARAMETERS OF GROUND VIBRATIONS CAUSED BY MINING TREMORS

**Summary.** The chosen aspects of quantities estimating of the surface vibration evoked by tremors induced by mining exploitation have been treated. The problems connected with the reconstruction of acceleration fields of the ground vibration have been discussed, basing on a pointwise registration, carried on the seismically threatened areas. A trial of using that registration for creating the regressive dependences enabling forecasting of the ground vibration level, has been described. The results have been confronted with the universally applied dependences, connecting the seismic activity with the accelerating amplitudes of the surface vibration. The basic sources of repeatedly occurring big mistakes of the estimations being performed, have been characterized.

### 1. Wprowadzenie

Wyniki coraz większej liczby rejestracji parametrów drgań gruntu służą do obiektywnej oceny oddziaływania wstrząsów towarzyszących aktualnie prowadzonej eksploatacji, a także

są wykorzystywane do szacowania dynamicznych oddziaływań na powierzchnię potencjalnych wstrząsów prognozowanych dla projektowanych robót górniczych. Na podstawie punktowych rejestracji drgań gruntu określa się przybliżony rozkład parametrów tych drgań na całym objętym wpływami obszarze. Parametry drgań gruntu wyznacza się na podstawie zależności wiążących energię sejsmiczną wstrząsu i odległość hipocentralną z wybranym parametrem (maksymalna amplituda przyspieszenia, prędkości drgań) charakteryzującym poziom drgań. W przypadku zależności ogólnych, podających wielkość drgań skalnego podłoża, uwzględnia się także wpływ lokalnych własności nadkładu na wielkość drgań powierzchni.

Prognoza wielkości drgań powierzchni, w tym porównawcza, odtwarzająca wpływy zaistniałych już zdarzeń, obarczona jest niejednokrotnie znaczącym błędem, spowodowanym:

- niedokładnością określenia energii i lokalizacji wstrząsów rejestrowanych (wykorzystywanych do wyznaczania parametrów zależności empirycznych), oraz prognozowanych dla projektowanych robót,
- silnymi zmianami lokalnych własności nadkładu, który wzmacnia (osłabia) drgania skalnego podłoża.

Autorzy na konkretnym przykładzie dynamicznych oddziaływań eksploatacji prowadzonej w kopalni Rydułtowy-Anna przedyskutowali niektóre z problemów związanych z odtwarzaniem rozkładów parametrów drgań powierzchni wywołanych wstrząsami indukowanymi eksploatacją.

## **2. Wysokoenergetyczne wstrząsy górotworu towarzyszące rozpatrywanej eksploatacji górniczej**

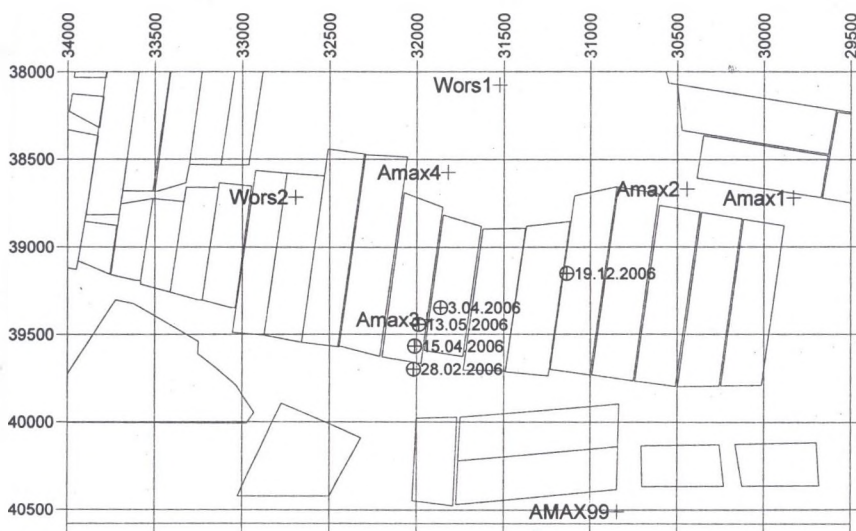
Drgania odczuwalne na powierzchni wywołują silne wstrząsy górotworu, których energia na ogół przekracza  $10^6$ J. W tabeli 1. zestawiono najsilniejsze zjawiska sejsmiczne indukowane eksploatacją KWK Rydułtowy-Anna – Ruch I zarejestrowane w 2006 r. Spowodowały one silne wpływy dynamiczne na powierzchni, wywołując zaniepokojenie mieszkańców.

Tabela 1

## Wybrane do analizy wysokoenergetyczne wstrząsy górotworu

Data	Energia [J]	Magnituda	Pokład	Ściana
28.02.2006	2E7	2,9	703/1	II-E1
3.04.2006	8E7	3,0	703/1	II-E1
15.04.2006	2E7	2,8	703/1	I-E1
13.05.2006	1E8	3,1	703/1	II-E1
19.12.2006	9E7	3,0	703/1	VI-E1

Na rys.1 pokazano lokalizację ognisk tych wstrząsów na tle konturów dokonanej i projektowanej w pokładzie 703/1 eksploatacji górniczej.



Rys. 1. Rozkład ognisk wybranych wstrząsów wysokoenergetycznych na tle eksploatacji dokonanej i projektowanej w pokładzie 703/1

Fig. 1. The distribution of the chosen high-energy tremors foci against the background of the exploitation carried and planned in the seam 703/1

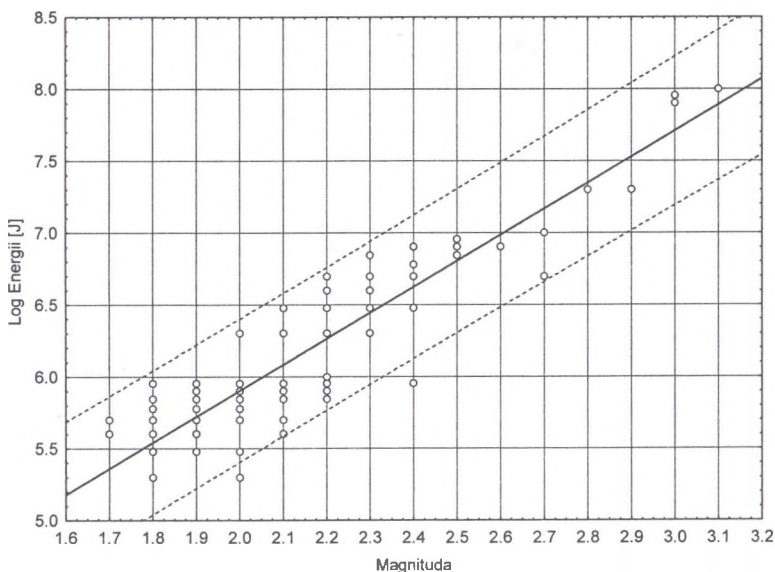
W przypadku najsilniejszych wstrząsów kopalniane stacje sejsmologiczne często nie są w stanie poprawnie określić energii sejsmicznej rejestrowanych zjawisk (ograniczona dynamika aparatury przy konieczności ustawienia wzmocnienia zapewniającego możliwość rejestracji słabych zjawisk powoduje przesterowanie zapisów). W takich przypadkach w kopalni Rydułtowy-Anna energię sejsmiczną wstrząsów oszacowaną na podstawie własnych zapisów weryfikuje się na podstawie obserwacji kopalń sąsiednich lub wartości magnitudy podawanych przez stacje sejsmologiczne PAN. Przy korzystaniu z wartości magnitudy wstrząsu niezbędna jest znajomość relacji wiążącej ją z energią sejsmiczną

wstrząsów. Stosując metody analizy regresji, można opracowywać tego typu relacje (S.Gibowicz [3], J.Dubiński i Z.Wierzchowska [2], A.Jaworski i P.Bańka [4]) dostosowane do lokalnych warunków, opierając się na zgromadzonym materiale obserwacyjnym.

Uwzględniając obserwacje z Ruchu I kopalni (2006 r. - rys. 2), wyznaczone równanie regresji wiążące magnitudy wstrząsów ( $M$ ) i ich energie sejsmiczne ( $E$ ) ma postać:

$$\log E = 1,8 M + 2,3 \quad (1)$$

Współczynnik determinacji wynosi 0,8. Błąd standardowy estymacji oszacowano na 0,25.



Rys. 2. Zależność energii wstrząsów od ich magnitudy – KWK Rydułtowy-Anna, Ruch I (naniesione granice 95% przedziału ufności)

Fig. 2. The dependence of the tremors energy on their magnitude – Rydułtowy-Anna mine (marked limits 95% of a confidence interval)

Stosunkowo niska wartość współczynnika determinacji wynika, z wykorzystania przy estymacji parametrów równania (1) wartości energii, wyznaczanych przez stację kopalnianą, dla silnych i bliskich zdarzeń często (przesterowanie zapisów) z dużym błędem. Należy podkreślić, że relacje powyższą ustalono na podstawie obserwacji 119 zdarzeń indukowanych w okresie ostatnich kilkunastu miesięcy na obszarze jednej kopalni, co stanowi o jej lokalnym charakterze. Korzystając z wyznaczonego równania regresji, energie analizowanych wstrząsów (tab.1) można oszacować następująco – tab. 2.

Tabela 2

Energie sejsmiczne silnych wstrząsów oszacowane na podstawie ich magnitudy

Magnituda	Energia [J]	Zakres energii – przy uwzgl. granic 95% przedz. ufności
2,8	2,2E7	6,9E6 – 7,2E7
2,9	3,4E7	1,0E7 – 1,1E8
3,0	5,1E7	1,5E7 – 1,7E8
3,1	7,8E7	2,3E7 – 2,6E8

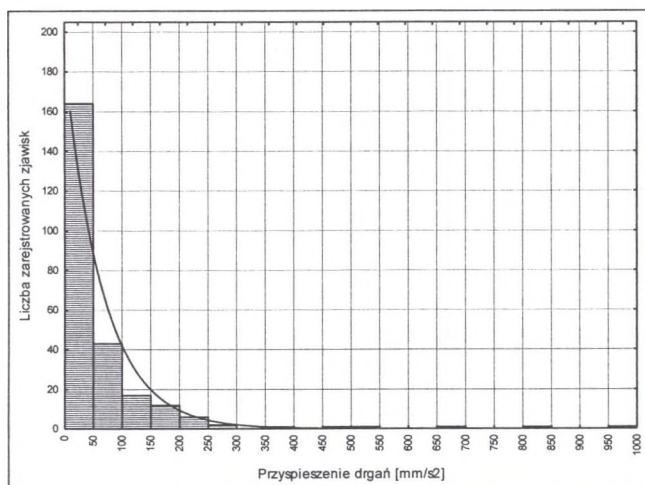
Uwzględniając granice 95% przedziału ufności, można uzyskać znaczące różnice w oszacowaniach. Stanowi to istotny problem, ponieważ określana energia sejsmiczna wstrząsów przekłada się wprost na pewność prognozy poziomu zagrożenia sejsmicznego, a w konsekwencji oszacowań oddziaływań wstrząsów górniczych na powierzchnię terenu.

Osobny, nieporuszony tu problem dotyczy dokładności lokalizacji epicentrow, a zwłaszcza hipocentrow wstrząsów górotworu.

### 3. Drgania gruntu generowane silnymi wstrząsami górotworu

W pełni obiektywne określanie parametrów drgań powierzchni wywołanych wstrząsami górniczymi wymaga prowadzenia ciągłych obserwacji na całym obszarze dynamicznych wpływów eksploatacji. Wymagałoby to takiego zagęszczenia sieci obserwacyjnej, które jest obecnie ze względów technicznych, organizacyjnych, a także ekonomicznych praktycznie niemożliwe. Konieczność określania wielkości drgań w punktach nieobjętych obserwacją zmusza do stosowania zależności wiążących wielkości wstrząsów charakteryzowane energią sejsmiczną i odległości epicentralne (hipocentralne) z maksymalnymi przyspieszeniami (prędkościami) drgań gruntu. W sejsmologii inżynierskiej funkcjonuje wiele zależności wiążących magnitudę lub energię sejsmiczną wstrząsu z maksymalnymi amplitudami przyspieszeń (prędkości) drgań gruntu w obszarze epicentralnym. Tego typu zależności umożliwiają również określenie spadku amplitud drgań z odległością wskutek tłumienia i pochłaniania fali. Zależności powyższe, weryfikowane na podstawie wyników punktowych pomiarów, wykorzystywane są do obliczania parametrów drgań w miejscach nieobjętych obserwacją. Służą one również do szacowania parametrów drgań powierzchni generowanych wstrząsami o prognozowanych energiach (magnitudach).

W KWK Rydułtowy-Anna - Ruch I pomiary przyspieszeń drgań gruntu wywołanych wstrząsami górniczymi prowadzone są aktualnie za pomocą 2 zestawów aparatury WORS-2 i zainstalowanych w 2005 roku 4 zestawów aparatury Amax. Na Ruchu II zainstalowane jest 1 stanowisko pomiarowe. Rozmieszczenie stanowisk pomiarowych przedstawiono na rys.1. W trakcie prowadzonych obserwacji na Ruchu I zarejestrowano 250 drgań powierzchni wywołanych wstrząsami górniczymi (uwzględniając zapisy drgań powierzchni wykonane tylko aparaturą Amax wywołanych wstrząsami wysokoenergetycznymi). Niektóre wstrząsy towarzyszące eksploatacji prowadzonej na Ruchu I wywołują silne drgania powierzchni, wzbudzając zaniepokojenie mieszkańców. Rysunek 3 przedstawia histogram zarejestrowanych przyspieszeń drgań.



Rys. 3. Histogram zarejestrowanych drgań gruntu – Ruch I

Fig. 3. The histogram of the registered ground vibration – the Ruch I

Do przedstawionych na rys. 3 danych empirycznych podjęto próbę dopasowania rozkładu wykładniczego, dla uzyskania bardziej precyzyjnego niż histogram opisu zjawisk. Estymowana postać rozkładu jest następująca: *Ilość obserwacji* =  $186 \exp(-0.0149a_{max})$ . Przy założeniu utrzymywania się średniej ilości rejestracji na dotychczasowym poziomie, wynoszącej około 15 zapisów drgań na miesiąc obserwacji, określono średnie czasy powrotu drgań gruntu o amplitudach przyspieszeń przekraczających: 100 mm/s<sup>2</sup> – odpowiednio około 12 dni; 200 mm/s<sup>2</sup> – odpowiednio 70 dni. Oznacza to stosunkowo duże zagrożenie wystąpieniem drgań powierzchni odczuwalnych przez mieszkańców.

Dysponując odpowiednio bogatym zbiorem obserwacji przyspieszeń (prędkości) drgań gruntu z danego – lokalnego obszaru, możliwe jest wyznaczenie parametrów modelu regresji przyspieszeń (prędkości) drgań względem energii sejsmicznych i odległości epicentralnych

wstrząsów towarzyszących eksploatacji prowadzonej w tym obszarze. W najprostszym modelu (S.Lasocki [5]) logarytm maksymalnej amplitudy składowej poziomej przyspieszenia drgań określa poniższe wyrażenie

$$\log a = a_1 \log E + a_2 R + a_3 \log R + a_4 + \varepsilon \quad (2)$$

gdzie:

$a$  – maks. amplituda składowej poziomej przyspieszenia drgań gruntu [ $m/s^2$ ],

$E$  – energia sejsmiczna wstrząsu [J],

$R$  – odległość hipocentralna [m],

$R = \sqrt{r^2 + h^2}$  [m]

$r$  – odległość epicentralna [m],

$h$  – przeciętna głębokość ognisk wstrząsów [m],

$a_i$  – parametry modelu regresji,

$\varepsilon$  – składnik losowy.

Nieuwzględnienie amplifikacji drgań przez podłoże (zmian współczynnika amplifikacji) powoduje zwiększenie wartości składnika losowego – a co jest z tym związane - błędów prognozy.

W tabeli 3 przedstawiono wyniki estymacji parametrów zastosowanego modelu regresji. Wyniki analizy regresji wykazały, że na poziomie istotności 95% nie można odrzucić hipotezy o zerowaniu się parametrów związanych z odległością epicentralną i wyrazu wolnego. Przeciętną głębokość ognisk wstrząsów przyjęto minimalizując błąd standardowy estymacji (tab. 4.) Przedział zmienności energii wstrząsów wykorzystanych w procesie estymacji parametrów modelu:  $2E5-1E8$  J, zakres zmienności odległości epicentralnej: 55-3220 m. Stosując metodę analizy regresji, należy zdawać sobie sprawę, że najdokładniejszych oszacowań przyspieszenia drgań można oczekiwać w „środku” zakresu zmienności wartości odległości epicentralnej, uwzględnianej do estymacji parametrów modelu. Gorszych rezultatów można się spodziewać z dala od „środka”. Dla wartości odległości epicentralnych i energii sejsmicznych niedostępnych przy estymacji parametrów modelu - należy oczekiwać dokładności jeszcze gorszej, coraz gorszej w miarę oddalania się od pierwotnego zakresu zmienności odległości epicentralnych (N. Draper i H. Smith [1]). Mimo iż można, na podstawie wyznaczonego równania regresji, otrzymać matematycznie wartości przewidywanych przyspieszeń drgań dla dowolnej wartości odległości epicentralnej i energii sejsmicznej, trzeba sobie zdawać sprawę z powyższych ograniczeń.

Wyznaczona wartość współczynnika determinacji wynosi  $R^2=0.71$ . Wynika stąd, że wyznaczone równanie może wyjaśnić 71% obserwowanej zmienności rejestrowanych przyspieszeń drgań gruntu.

Tabela 3

## Wyniki estymacji parametrów modelu regresji

R=0,84 R <sup>2</sup> = 0,71 F(3,272)=219,28 p<0,0000 Błąd std. estymacji: 0,23332						
276 obs.	BETA	Błąd st.	B	Błąd st.	t(272)	poziom p
W. wolny			0,101588	0,723582	0,14040	0,888451
Log_E	0,777735	0,033704	0,546522	0,023684	23,07518	0,000000
R	-0,228313	0,126924	-0,000143	0,000079	-1,79882	0,073156
Log_R	-0,268616	0,126045	-0,549596	0,257892	-2,13110	0,033977

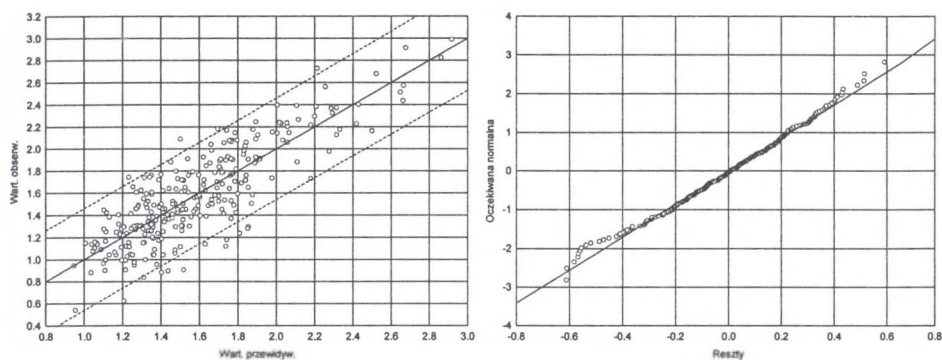
Tabela 4

## Wartość błędu estymacji w zależności od przyjętej przeciętnej głębokości wstrząsów

Głębokość h [m]	Błąd stand.estymacji
300	0,233420
400	0,233341
450	0,233325
<u>500</u>	<u>0,233324</u>
550	0,233339
600	0,233366
700	0,233453
800	0,233573
900	0,233712

Analizy wartości przewidywanych, zmiennych resztowych, przeprowadzone dla obu zbiorów danych, nie wykazały istnienia błędów modelu regresji, wymagających jego modyfikacji (rys.4).





Rys. 4. Wykres wartości przewidywanych i normalności rozkładu zmiennych resztowych

Fig. 4. The diagram of predicted values and normality of the rest variable distribution

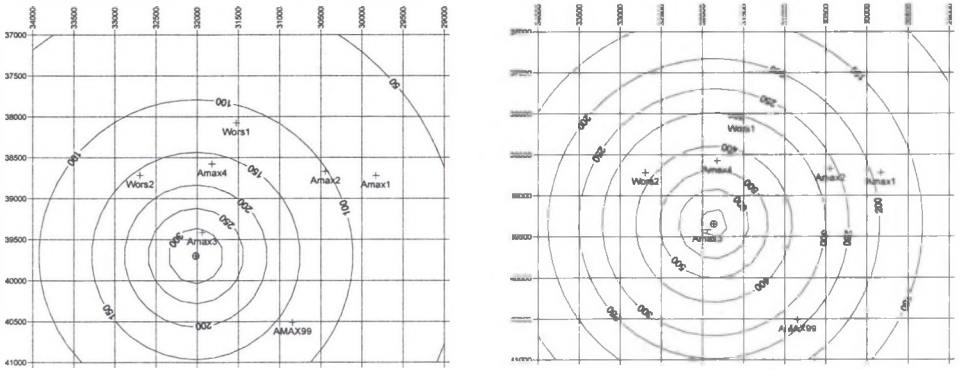
Z uwagi na niestacjonarny charakter obserwowanych procesów w miarę poszerzania katalogu obserwacji, konieczne jest okresowe weryfikowanie wartości tych parametrów. Mówiąc o pewności prognozy, wymaga podkreślenia, że ze względu na stosowanie do określania parametrów drgań metody analizy regresji, mogą wystąpić drgania większe niż prognozowane stosowanym równaniem. Statystycznie dotyczy to 50% obserwacji. Jakie wartości z zadaniem prawdopodobieństwem nie zostaną przekroczone, określa górna granica przedziału ufności. W tabeli 5 podano zmierzone wartości przyspieszeń drgań gruntu wywołanych analizowanymi wstrząsami (rys.1, tab.1) – podano wartości przyspieszeń określone dla drgań przefiltrowanych, do 10 Hz.

Tabela 5

Wartości maksymalnych amplitud składowych poziomych przyspieszeń drgań gruntu

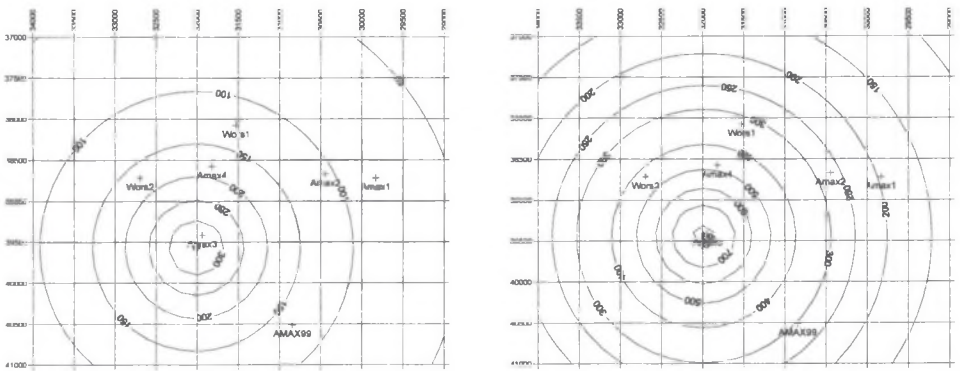
Data wstrząsu	Maksymalna amplituda przyspieszenia drgań [mm/s <sup>2</sup> ]			
	AMAX 1	AMAX 2	AMAX 3	AMAX 4
28.02.2006	150	250	-	532
3.04.2006	96	168	668	272
15.04.2006	77	171	480	366
13.05.2006	210	252	979	822
19.12.2006	-	-	373	326

Na rys. 5–7 pokazano wyniki oszacowań maksymalnych amplitud składowej poziomej przyspieszeń drgań gruntu wywołanych analizowanymi wstrząsami. Wyniki otrzymano przy wykorzystaniu równania regresji wyznaczonego (tab. 3) na podstawie wyników dotychczasowych rejestracji parametrów drgań.



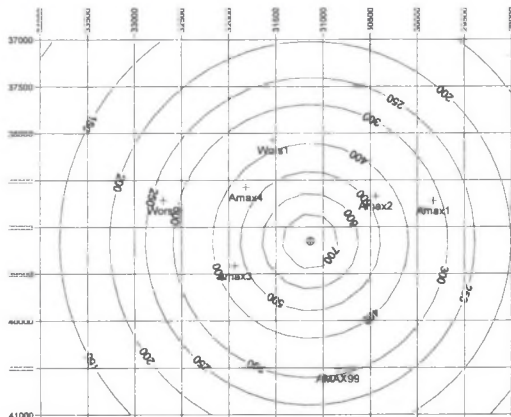
Rys. 5. Rozkłady przyspieszeń drgań gruntu wywołanych wstrząsami z dni 28.02.2006 r. i 3.04.2006 r.

Fig. 5. The accelerating distributions of the ground vibration evoked by the tremors of 28.02.2006 and 3.04.2006



Rys. 6. Rozkłady przyspieszeń drgań gruntu wywołanych wstrząsami z dni 15.04.2006 r. i 13.05.2006 r.

Fig. 6. The accelerating distributions of the ground vibration evoked by the tremors of 15.04.06 and 13.05.06



Rys. 7. Rozkład przyspieszeń drgań gruntu wywołanych wstrząsem z dnia 19.12.2006 r.

Fig. 7. The accelerating distribution of the ground vibration evoked by the tremor of 19.12.2006

Próbie odtworzenia zarejestrowanych przyspieszeń drgań podjęto również wykorzystując często stosowaną do obliczania rozkładu maksymalnych amplitud składowych poziomych przyspieszeń drgań przy zadanych: energii wstrząsu i odległości epicentralnej zależność G.Mutke [6]:

$$a_{\max} = [1,33 \cdot 10^{-3} (\log E)^{2,66} - 0,089] \cdot [1,53 \cdot R^{0,155} \exp(-0,65R) + 0,014] \quad (3)$$

gdzie:

$a_{\max}$  - maksymalne amplitudy przyspieszenia drgań podłoża skalnego (do 10 Hz) [m/s<sup>2</sup>],

E - energia sejsmiczna wstrząsu [J],

R - odległość hipocentralna [km]  $R = \sqrt{D^2 + 0,5^2}$ ,

D - odległość epicentralna [km].

Wartości współczynnika amplifikacji drgań przez warstwy nadkładu, niezbędne do wyznaczenia zależnościami (3) parametrów drgań powierzchni określono (dla punktów pomiarowych AMAX-1 – AMAX-4) minimalizując funkcję

$$\sum_{i=1}^{lwst} (aobs_i - amp \cdot aobl_i)^2 \quad (4)$$

gdzie:

aobs – zmierzone przyspieszenia drgań gruntu [mm/s<sup>2</sup>],

amp – współczynnik amplifikacji drgań w miejscu zainstalowania aparatury,

aobl – obliczone maksymalne przyspieszenia drgań skalnego podłoża [mm/s<sup>2</sup>],

lwst – liczba analizowanych zapisów (4 lub 5 – tab.5).

Obliczając pochodną (4) względem współczynnika amplifikacji drgań i porównując ją do zera, otrzymuje się następujące oszacowanie jego wartości ·

$$amp = \frac{\sum_{i=1}^{lwst} aobs_i \cdot aobl_i}{\sum_{i=1}^{lwst} aobl_i^2} \quad (5)$$

Wyznaczone na podstawie obserwacji (tab. 5) wartości współczynnika amplifikacji drgań podano w tab. 6.

Tabela 6

Wyznaczone wartości współczynnika amplifikacji drgań

Aparatura	Wyznaczona wartość współczynnika amplifikacji drgań	Zakres zmienności wsp.ampl. (aobs/aobl <sub>i</sub> )
AMAX-1	1,6	0,9 – 2,3
AMAX-2	1,8	1,2 – 2,9
AMAX-3	3,0	1,9 – 3,9
AMAX-4	2,6	1,4 – 4,2

W tabeli 7 przedstawiono wartości błędu średniokwadratowego dla wykonanych oszacowań zarówno wyznaczonym modelem regresji, jak również regresyjną zależnością G.Mutke.

Tabela 7  
Wartość błędu średniokwadratowego obliczona dla wykonanych oszacowań

Wstrząs	Aparatura	Obl.przysp. drgań [mm/s <sup>2</sup> ]		Błąd średniokwadratowy	
		Wzór 2	Wzory 3 - 5	Wzór 2	Wzory 3 - 5
28.02.2006	AMAX-1	195	155	190	193
	AMAX-2	268	238		
	AMAX-3	826	741		
	AMAX-4	474	524		
3.04.2006	AMAX-1	76	102	234	132
	AMAX-2	101	155		
	AMAX-4	163	330		
15.04.2006	AMAX-1	187	161	117	138
	AMAX-2	261	247		
	AMAX-3	723	707		
	AMAX-4	458	526		
13.05.2006	AMAX-1	78	106	124	26
	AMAX-2	106	161		
	AMAX-3	331	519		
	AMAX-4	179	351		
19.12.2006	AMAX-3	461	591	104	202
	AMAX-4	444	511		

W zależności od przypadku dokładniejszy okazał się pierwszy sposób bądź drugi. Jak wynika z zamieszczonych wyników obliczeń, wartości błędów oszacowań ulegają silnym wahaniom – od bardzo dobrego wyniku – błąd średniokwadratowy wynoszący 26 mm/s<sup>2</sup> aż do 234 mm/s<sup>2</sup>.

#### 4. Podsumowanie

Zasadnicze zagęszczenie sieci pomiarowej w obszarze KWK Rydułtowy-Anna umożliwia weryfikację analitycznie obliczanych po wystąpieniu silnych drgań wartości maksymalnych amplitud przyspieszeń w punktach nieobjętych obserwacją. Wzrastająca liczba obserwacji umożliwia również aktualizację wartości parametrów stosowanych metod prognostycznych (m.in.współczynnika amplifikacji drgań), co przekłada się na zwiększenie dokładności wykonywanych oszacowań parametrów drgań powierzchni.

Mimo dokonującego się postępu, z uwagi na złożoność zachodzących w głębi górotworu i w warstwach przypowierzchniowych zjawisk, nadal jednak prognozy dynamicznych

oddziaływań eksploatacji na powierzchnię w wielu przypadkach obarczone są znaczącym błędem i wymagają okresowej weryfikacji.

## LITERATURA

1. Draper N.R., Smith H.: Analiza regresji stosowana. PWN, Warszawa 1973.
2. Dubiński J., Wierzchowska Z.: Metody obliczeń energii wstrząsów górotworu na Górnym Śląsku. Komunikat GIG nr 591, Katowice 1973.
3. Gibowicz S.: Klasyfikacja energetyczna wstrząsów podziemnych na Górnym Śląsku i częstotliwość ich wstępowania w zależności od wielkości energii. Arch. Górn. 7, Kraków 1963.
4. Jaworski A., Bańka P.: Uwagi o energii rejestrowanych silnych wstrząsów i wielkości wywoływanych nimi drgań gruntu. Mat.XIII Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej GZN 2006, Wyd.GIG, Katowice 2006.
5. Lasocki S., Szubiński M., Matuszyk J., Mirek J., Pielesz A.: Prognozowanie drgań powierzchni wywołanych wstrząsami górniczymi – przegląd krytyczny. Warsztaty 2000 nt. Zagrożenia naturalne w górnictwie, Kraków 2000.
6. Mutke G.: Metoda prognozowania parametrów drgań podłoża generowanych wstrząsami górniczymi w obszarze GZW. Praca doktorska (niepublikowana), Katowice 1991.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Edward Maciąg