# 19

# OPIS DRGAŃ POWIERZCHNI TERENU WYWOŁANYCH WSTRZĄSAMI GÓROTWORU UWZGLĘDNIAJĄCY KIERUNKOWOŚĆ TŁUMIENIA DRGAŃ

### WPROWADZENIE

W wielu zakładach górniczych eksploatacja złoża indukuje wysokoenergetyczne wstrzasy górotworu. Wstrzasy te moga wywoływać tapniecia w wyrobiskach górniczych, jednak coraz częściej są one przyczyną występowania drgań powierzchni terenu wzbudzających zaniepokojenie mieszkańców, a także powodujących uszkodzenia obiektów budowlanych. Pomimo tego, że uszkodzenia te z reguły dotyczą elementów niekonstrukcyjnych budynków, to ze względu na negatywny odbiór społeczny tych zjawisk, kopalnie rozbudowuja sieci obserwacyjne, tak by móc w sposób ciągły monitorować parametry drgań gruntu wywoływanych wstrząsami górotworu. Najczęściej wielkość drgań określana jest poprzez podanie maksymalnej amplitudy wypadkowej poziomych składowych przyspieszenia lub predkości drgań oraz czasu trwania tych drgań. W dalszej części artykułu maksymalne amplitudy wypadkowej poziomych składowych przyspieszenia drgań gruntu będą skrótowo nazywane przyspieszeniami drgań gruntu. Ponieważ praktycznie nie jest możliwe prowadzenie obserwacji parametrów drgań we wszystkich podlegających wpływom tych drgań obiektach, konieczne jest dysponowanie zależnościami pozwalającymi określić przyspieszenia lub predkości drgań gruntu w zależności od energii sejsmicznej wywołującego je wstrząsu i jego odległości epicentralnej (hipocentralnej). Z reguły zależności te wyznaczane sa metoda analizy regresji. Wynika to ze znacznego skomplikowania analitycznego opisu zjawisk zachodzących pomiędzy źródłem drgań (hipocentrum wstrząsu), a powierzchnią terenu. Równania regresji wyznaczone z wykorzystaniem wyników wcześniejszych obserwacji noszą nazwę relacji tłumienia. Zarówno w sejsmologii globalnej, jak i w sejsmologii górniczej z reguły wykorzystywane są relacje tłumienia nieuwzględniające kierunkowości rozchodzenia się drgań. W literaturze można znaleźć wiele przykładów różnych postaci tych zależności [2, 4, 6]. Bardzo obszerne zestawienie różnych relacji tłumienia wykorzystywanych w sejsmologii globalnej zawiera praca [5]. W zagadnieniach górniczych z reguły wykorzystywany jest model zaproponowany w pracy [4].

Czesto po wystapieniu drgań generowanych wstrzasami górotworu stwierdza się duże zróżnicowanie wielkości zaobserwowanych przyspieszeń i prędkości drgań w punktach położonych w zbliżonej odległości epicentralnej, niejednokrotnie wielkość drgań gruntu w punktach położonych bliżej epicentrum wstrzasu jest mniejsza niż w punktach obserwacyjnych położonych dalej od epicentrum rozpatrywanego wstrzasu. Nie zawsze zjawisko to można wytłumaczyć zmianami wartości współczynnika amplifikacji drgań. Podobne obserwacje stwierdzane są w sejsmologii globalnei [11]. Świadczyć to może o kierunkowym charakterze tłumienia drgań gruntu wywoływanych zjawiskami sejsmicznymi. Spośród stosunkowo nielicznych prac, w których przedstawiono możliwość uwzglednienia kierunkowości tłumienia drgań powierzchni terenu można wymienić [8, 11]. Zaproponowany przez autorów artykułu [11] model charakteryzuje stosunkowo duża, wynoszaca 9, liczba parametrów. Wymaga to dysponowania wynikami pomiarów z wielu stanowisk aparatury pomiarowej. W przypadku sieci obserwacyjnych instalowanych przez zakłady górnicze, z reguły dysponujemy danymi o zarejestrowanych drganiach powierzchni terenu określonymi przez stosunkowo mała liczbę, kilku, rzadko kilkunastu zestawów aparatury pomiarowej. Z tego powodu konieczne jest wykorzystanie prostszych modeli regresji. W artykule zastosowano model zaproponowany w [3].

Obliczenia przyspieszeń drgań gruntu, których wyniki podano w niniejszej pracy, przeprowadzono dla danych pochodzących z obszaru górniczego silnie zagrożonej sejsmicznie kopalni położonej w GZW. Ze względu na trudność związaną z wiarygodnym określeniem wartości współczynnika amplifikacji drgań przez luźne utwory czwartorzędowe, pominięto wpływ jego zróżnicowania na wielkość drgań gruntu. Nieuwzględnienie zróżnicowania wartości współczynnika amplifikacji drgań przekłada się na zwiększenie odchylenia standardowego składnika resztowego [9].

# ZALEŻNOŚCI WIĄŻĄCE PRZYSPIESZENIA DRGAŃ GRUNTU Z ENERGIAMI SEJSMICZNYMI I ODLEGŁOŚCIAMI EPICENTRALNYMI WYWOŁUJĄCYCH JE WSTRZĄSÓW

Do opisu pola przyspieszeń drgań gruntu wywołanych rozpatrywanymi wstrząsami górotworu wykorzystano dwie postacie relacji tłumienia. Pierwsza z nich, często wykorzystywana do obliczania parametrów drgań gruntu generowanych wstrząsami górotworu, ma prostą, jednakże mającą uzasadnienie fizyczne [10], postać:

$$\log a = a_1 \log E + a_2 R + a_3 \log R + a_4 + \varepsilon \tag{1}$$

gdzie:

2018 Volume 7 issue 1

- *a* oznacza maksymalne amplitudy wypadkowych poziomych składowych przyspieszeń drgań gruntu [m/s<sup>2</sup>],
- E oznacza energię sejsmiczną wstrząsu [J],
- *R* to odległość hipocentralna [m] ( $R = \sqrt{r^2 + h^2}$ );
- *r* to odległość epicentralna [m],
- *h* jest głębokością wstrząsu [m],
- *a<sub>i</sub>* są parametrami regresji,
- $\varepsilon$  to składnik losowy.

Stosując model określony równaniem (1) z reguły nie uwzględnia się głębokości ognisk wstrząsów wyznaczonych w procesie ich lokalizacji. Wynika to z bardzo dużego błędu ich określenia. Zamiast tego, w obliczeniach przyjmuje się przeciętną głębokość wstrząsów (często zakłada się, że h = 500 m). Wartość h można także ustalić przeprowadzając minimalizację odchylenia standardowego składnika resztowego w zależności od przyjętej wartości głębokości wstrząsów. W obliczeniach których wyniki zaprezentowano w artykule, uwzględniano odległość epicentralną wstrząsów (przyjmując h = 0 m).

Analizy przeprowadzono dla wybranych 9 najsilniejszych wstrząsów, które wystąpiły w przedmiotowej kopalni węgla kamiennego w latach 2007-2017. W związku z tym, że każdy wstrząs był rozpatrywany niezależnie, z modelu określonego równaniem (1) usunięto wyraz związany z energią sejsmiczną wstrząsu (stosując zaprezentowane podejście, dla każdego z analizowanych przypadków drgań gruntu ma ona niezmienną wartość). Po uwzględnieniu powyższej uwagi i zmianie indeksów, równanie (1) można zapisać następująco:

$$\log a = a_1 R + a_2 \log R + a_3 + \varepsilon \tag{2}$$

Model opisany równaniem (2) w dalszej części artykułu będzie określany jako model 1.

Do opisu drgań gruntu wywołanych rozpatrywanymi wstrząsami wykorzystano także model umożliwiający uwzględnienie kierunkowości rozchodzenia się drgań w górotworze. Model ten, zaproponowany w [3], umożliwia uwzględnienie anizotropii tłumienia drgań poprzez przyjęcie, że izosejsty przyjmują kształt elipsy, obróconej wokół pionowej osi Z o kąt q. Opisany jest on równaniem (3):

$$\log a = a_1 \log E + a_2 R^* + a_3 \log R^* + a_4 + \varepsilon$$
 (3)

gdzie:

 $R^* = \sqrt{l^2 + m^2},$   $l = p((x_w - x_{st}) \cos q + (y_w - y_{st}) \sin q),$   $m = (x_{st} - x_w) \sin q + (y_w - y_{st}) \cos q,$   $x_w, y_w, z_w \text{ są współrzędnymi wstrząsu,}$   $x_{st}, y_{st}, z_{st} \text{ są współrzędnymi stanowiska pomiarowego,}$ p, q to parametry,  $p > 0, q \in (0, 2\pi)$ , pozostałe oznaczenia – jak wyżej.

Model opisany równaniem (3) został opracowany z wykorzystaniem zależności opisujących transformację układu współrzędnych [1]:

- zmiana skali wzdłuż osi X:

$$x_n = px_s, \qquad y_n = y_s \tag{4}$$

- obrót dookoła osi Z o kąt q:

$$x_n = x_s \cos q + y_s \sin q, \quad y_n = -x_s \sin q + y_s \cos q \tag{5}$$

gdzie:

 $x_s$ ,  $y_s$  – współrzędne w oryginalnym układzie współrzędnych,

 $x_n$ ,  $y_n$  – współrzędne w nowym układzie współrzędnych,

p – skala wzdłuż osi X,

q – kąt obrotu układu współrzędnych dookoła osi Z.

Analogicznie, jak w przypadku modelu 1, z równania (3) usunięto wyraz związany z energią wstrząsu. Ostatecznie postać modelu 2 opisana jest równaniem:

$$\log a = a_1 R^* + a_2 \log R^* + a_3 + \varepsilon \tag{6}$$

W przypadku modelu 2, na parametry  $a_1, a_2$  i  $a_3$  narzucono następujące ograniczenia ich zmienności:

$$-1 \le a_1 \le 0 
-10 \le a_2 \le 0 
-100 \le a_3 \le 100 
0 \le p \le 100 
0 \le q \le 2\pi$$

Parametry modelu 1 estymowano z wykorzystaniem metody analizy regresji [6]. Ze względu na ograniczenia (7), wyznaczanie parametrów modelu 2 potraktowano jako zadanie programowania nieliniowego z ograniczeniami liniowymi. Funkcja celu  $f_c$  została zdefiniowana następująco:

$$f_{c} = \left(\sum_{i=1}^{l_{obs}} (A_{obs_{i}} - A_{obl_{i}})^{2}\right)^{\frac{1}{2}}$$
(8)

gdzie:

lobs oznacza liczbę obserwacji,

A<sub>obsi</sub> to zaobserwowane maksymalne amplitudy przyspieszeń drgań gruntu na i-tym stanowisku pomiarowym,

A<sub>obli</sub> oznacza obliczone maksymalne amplitudy przyspieszeń drgań gruntu na i-tym stanowisku pomiarowym.

Wartości parametrów wyznaczano algorytmem ewolucyjnym, zaimplementowanym w dodatku Solver programu Microsoft Excel.

## OBSERWACJE PRZYSPIESZEŃ DRGAŃ GRUNTU WYWOŁANYCH WSTRZĄSAMI GÓROTWORU W REJONIE BADAŃ

Rejestracje drgań gruntu w przedmiotowym obszarze prowadzone są z wykorzystaniem 14 zestawów aparatury pomiarowej. Lokalizację stanowisk pomiarowych podano w tab. 1 oraz przedstawiono na rys. 1. W rezultacie obserwacji prowadzonych w latach 2007-2017 zarchiwizowano blisko 8500 drgań powierzchni terenu wywołanych wstrząsami górotworu indukowanymi prowadzonymi robotami górniczymi. W analizach, których wyniki przedstawiono w artykule, wykorzystano dane o maksymalnych amplitudach przyspieszeń drgań gruntu, które zostały wywołane wstrząsami o energii sejsmicznej nie mniejszej od 10<sup>7</sup> J. Dodatkowo przyjęto, że drgania musiały być zarejestrowane na co najmniej 10 stanowiskach sieci obserwacyjnej.

Numer stanowiska	X [m]	Y [m]
1	21870	-37450
2	28050	-34070
3	20750	-36500
4	20460	-38279
5	26257	-33238
6	25610	-37932
7	23508	-42682
8	20860	-41334
9	15530	-35620
10	23922	-39683
11	22700	-40831
12	25056	-41110
13	19310	-34900
14	23082	-33272

|--|

Ostatecznie, uwzględniono 9 wstrząsów, których energię i lokalizację epicentrum podano w tabeli 2. Epicentra tych wstrząsów zostały naniesione na rys. 1.

Tubela E Eller Sta B	abera - mergia sejsimezna, ronanzaeja rozpaci y nanyen nserząsow gorocnora										
Numer wstrząsu	Energia [J]	X [m]	Y [m]								
1	6x10 <sup>7</sup>	24233	-33691								
2	2x107	23620	-33820								
3	2x10 <sup>7</sup>	23780	-33910								
4	2x107	23983	-34389								
5	3x10 <sup>7</sup>	24386	-34656								
6	2x10 <sup>7</sup>	20150	-35085								
7	3x10 <sup>7</sup>	20455	-35493								
8	5x10 <sup>7</sup>	22539	-36808								
9	2x10 <sup>7</sup>	18916	-37137								

#### Tabela 2 Energia sejsmiczna, lokalizacja rozpatrywanych wstrząsów górotworu



Rys. 1 Lokalizacja stanowisk sieci obserwacyjnej, epicentra wstrząsów górotworu

Maksymalne amplitudy przyspieszeń drgań gruntu w analizowanym zbiorze obserwacji wyniosły 0,565 m/s<sup>2</sup>. Wywołał je wstrząs nr 3, zarejestrowane zostały na stanowisku nr 14. Wszystkie wyniki obserwacji zostały przedstawione w tabeli 3.

	rozpatrywanymi wstrząsami gorotworu [x10 <sup>-3</sup> m/s <sup>2</sup> ]											
Numer wstrząsu Numer	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
stanowiska												
1	28,33	18,23	28,24	13,53	19,25	79,22	32,53	302,45	38,86			
2	134,54	97,11	48,01	100,62	63,40	11,2	8,61	43,15	28,3			
3	-	18,11	34,46	-	-	205,15	179,3	-	91,46			
4	-	13,72	34,43	-	-	-	38,69	-	42,44			
5	292,43	344,83	103,88	328,70	-	18,85	19,61	80,13	29,51			
6	64,86	52,06	42,21	35,07	18,26	11,94	10,25	17,99	-			
7	8,04	-	-	-	-	-	-	13,25	-			
8	12,11	12,35	3,18	6,63	10,54	37,99	21,25	57,91	32,92			
9	7,54	-	6,03	-	6,26	18,72	31,47	16,64	27,67			
10	-	17,91	19,63	18,79	9,81	17,33	19,32	33,70	16,44			
11	13,59	10,8	9,86	10,68	2,93	15,67	13,94	22,57	19,06			
12	13,79	12,66	13,15	10,32	5,22	7,62	10,7	55,04	7,16			
13	25,46	-	22,25	10,76	32,2	339,92	472,96	104,44	65,64			
14	-	128,69	565,18	101,92	404,55	45,25	22,43	80,51	22,85			

Tabela 3 Przyspieszenia drgań gruntu wywołanych rozpatrywanymi wstrzasami górotworu [x10<sup>-3</sup> m/s<sup>2</sup>]

Drgania gruntu wywołane rozpatrywanymi wstrząsami (z wyjątkiem zjawisk oznaczonych nr 1 i nr 9) charakteryzowały się przyspieszeniami drgań przekraczającymi 0,3 m/s<sup>2</sup>. W przypadku wstrząsu nr 1, wartość przyspieszeń drgań gruntu wyniosła 0,292 m/s<sup>2</sup>, natomiast wstrząs nr 9 wywołał drgania znacznie słabsze – w tym przypadku przyspieszenia drgań wyniosły zaledwie 0,091 m/s<sup>2</sup>.

Zakres zmienności odległości epicentralnych wyniósł odpowiednio:

- dla wstrząsu nr 1: od 2074 m do 8354 m,
- dla wstrząsu nr 2: od 768 m do 8005 m,
- dla wstrząsu nr 3: od 946 m do 8425 m,
- dla wstrząsu nr 4: od 1435 m do 7615 m,
- dla wstrząsu nr 5: od 1902 m do 8908 m,
- dla wstrząsu nr 6: od 860 m do 7965 m,
- dla wstrząsu nr 7: od 1049 m do 7727 m,
- dla wstrząsu nr 8: od 927 m do 7109 m,
- dla wstrząsu nr 9: od 1920 m do 9635 m.

Wykonując odtworzenia pól przyspieszeń drgań wywołanych rozpatrywanymi wstrząsami górotworu, przyjmowano wartość odległości epicentralnej nie mniejszą od wykorzystanej podczas estymacji parametrów modeli.

# OPIS POLA PRZYSPIESZEŃ DRGAŃ GRUNTU WYWOŁANYCH ROZPATRYWANYMI WSTRZĄSAMI GÓROTWORU

Wykorzystując scharakteryzowany w poprzednim punkcie materiał obserwacyjny, odtworzono pola przyspieszeń drgań gruntu wywołanych analizowanymi wstrząsami górotworu. W tym celu wyznaczono parametry modelu 1 (tab. 4) oraz modelu 2 (tab. 5).

Numer	Wa	artosc parame	etru	Udchylenie standardowe parametru								
wstrząsu	<b>a</b> 1	<b>a</b> 2	<b>a</b> 3	<b>a</b> 1	<b>a</b> 2	<b>a</b> 3						
1	-1,5E-05	-2,35087	10,33754	0,000104	1,226449	3,979695						
2	-0,00021	0,220885	1,731856	0,000147	1,111206	3,370054						
3	-0,00012	-1,14888	6,26023	6,46E-05	0,554149	1,720567						
4	-0,00021	-0,15627	3,004017	0,000252	2,244282	7,009841						
5	0,000302	-5,8637	21,25901	0,000203	2,183626	7,015072						
6	-6E-05	-1,19383	6,132591	7,66E-05	0,594808	1,793253						
7	9,41E-05	-2,34003	9,435975	0,000111	0,863739	2,616008						
8	3,9E-05	-1,40472	6,548711	0,000177	1,276707	3,870995						
9	0,000164	-2,52217	9,825688	9,97E-05	1,046228	3,326966						

Tabela 4 Wyniki estymacji parametrów modelu 1

Na przyjętym poziomie istotności wynoszącym 0,05, na podstawie wyników testu F Fischera-Snedecora, nie ma podstaw do uznania, że regresja jest nieistotna.

Przeprowadzona analiza rozkładów zmiennych resztowych także nie wykazała istnienia błędów modeli, wymagających ich modyfikacji [6].

W tabeli 5 przedstawione zostały wyniki estymacji parametrów modelu 2.

rubela 5 Wymini estymaeji parametrow modela 2											
Numer		Wartość parametru									
wstrząsu	<b>a</b> 1	<b>a</b> 2	<b>a</b> 3	р	q						
1	0,00000	-2,41500	11,28223	2,77940	0,96242	-34,9					
2	0,00000	-0,99424	6,79771	83,81489	1,70351	7,6					
3	-0,00006	-1,30445	6,70052	1,27011	1,04522	-30,1					
4	-0,00160	0,00000	8,58892	3,32299	1,68542	6,6					
5	0,00000	-3,19212	13,54961	2,17157	1,29679	-15,7					
6	-0,00006	-1,22060	6,16194	0,73734	1,52149	-2,8					
7	0,00000	-2,15416	9,59345	2,63703	1,41551	-8,9					
8	0,00000	-0,78764	4,82985	3,38634	2,41930	48,6					
9	0,00000	-1,01026	5,35001	2,08669	2,27975	40,6					

Tabela 5 Wyniki estymacji parametrów modelu 2

W siódmej kolumnie tabeli 5 podano wielkość kąta pomiędzy osią X, a kierunkiem najmniejszego tłumienia drgań gruntu. Zwraca uwagę to, że dla par wstrząsów 1 i 3, 2 i 4, 6 i 7, a także 8 i 9 wartości tych kątów są zbliżone do siebie. Identyfikacja parametrów modeli 1 i 2 dla każdego z rozpatrywanych wstrząsów umożliwiła wykonanie odtworzenia pola przyspieszeń drgań powierzchni terenu, wywołanych tymi wstrząsami. Wyniki obliczeń modelem 1 podano w tabeli 6, natomiast modelem 2 – w tabeli 7. Rezultaty obliczeń podano tylko dla tych stanowisk, w których zarejestrowano drgania gruntu wywołane danym wstrząsem.

Tabela 6 Obliczone z wykorzystaniem modelu 1 przyspieszenia drgań gruntu wywołanych rozpatrywanymi wstrząsami [x10<sup>-3</sup> m/s<sup>2</sup>]

rozpaci y wanyini wsci ząsanii [xro m/s ]											
Numer wstrząsu Numer stanowiska	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	49,87	48,15	42,77	44,57	26,86	65,81	55,87	261,11	35,78		
2	71,79	40,40	37,20	36,78	28,05	9,88	11,62	29,25	22,78		
3	-	50,32	43,66	-	-	171,99	292,22	-	70,93		
4	-	25,74	19,88	-	-	-	43,34	-	72,32		
5	323,35	83,79	107,63	84,25		16,04	13,92	34,30	20,07		
6	49,34	38,17	34,37	40,50	34,22	17,26	15,25	54,87	-		
7	8,07	-	-	-	-	-	-	30,10	-		
8	9,89	8,21	6,45	5,83	6,26	16,53	14,82	36,52	21,88		
9	8,33	-	5,35	-	6,10	29,75	18,16	26,02	27,00		
10	-	21,50	17,30	19,39	11,67	18,53	16,10	56,40	19,49		
11	14,05	12,54	9,83	10,00	7,42	16,54	15,00	43,85	20,04		
12	13,28	10,66	8,59	8,84	7,28	10,45	12,15	35,41	19,01		
13	35,75	-	31,56	26,48	11,49	377,84	190,06	47,25	54,07		
14	-	161,45	533,04	159,65	402,49	50,29	30,49	49,72	19,40		

2018

Volume 7 issue 1

	•••	worunger	1102puu j	wunymi	WSti Ząsu	ini [XIU			
Numer wstrząsu	1	2	2	Λ	F	6	7	0	0
Numer stanowiska	I	2	Э	4	5	0	/	0	7
1	25,27	23,91	35,58	0,00	15,09	72,75	45,45	302,48	41,46
2	133,75	95,57	44,71	100,52	64,14	8,13	9,55	48,87	17,39
3	-	35,28	37,81	-	-	208,21	181,07	-	88,46
4	-	20,14	18,38	-	-	-	18,84	-	52,33
5	292,33	344,34	99,38	328,57	-	13,92	9,81	78,34	22,77
6	65,98	18,58	39,43	0,00	24,28	15,48	20,90	46,38	-
7	6,15	-	-	-	-	-	-	32,90	-
8	5,70	11,41	7,27	0,00	1,32	24,45	3,90	60,59	21,75
9	8,67	-	8,53	-	4,49	25,11	36,02	26,83	28,47
10	-	13,80	18,41	0,00	4,70	20,41	8,82	47,68	18,43
11	8,97	11,84	10,80	0,00	2,11	21,49	5,09	48,33	18,50
12	12,75	10,90	11,29	0,00	2,42	11,77	4,69	32,83	13,73
13	32,60	-	34,56	11,16	31,64	338,85	471,81	40,09	59,13
14	-	129.75	565.53	102.09	404.34	48.67	19.13	61.91	35.96

Tabela 7 Obliczone z wykorzystaniem modelu 2 przyspieszenia drgań gruntu wywołanych rozpatrywanymi wstrzasami [x10<sup>-3</sup> m/s<sup>2</sup>]

Tabela 8 Charakterystyka dokładności odtworzenia zaobserwowanych wartości przyspieszeń drgań

	wartooti przyopressen argan									
Numer wstrzasu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
WSti Zųsu			Mo	ndel 1						
Bład										
średniokwadratowy [x 10 <sup>-3</sup> m/s <sup>2</sup> ]	23,90	82,43	11,95	82,71	14,29	16,77	84,90	31,31	12,46	
Współczynnik korelacji	0,97	0,57	0,998	0,54	0,99	0,99	0,74	0,93	0,83	
Maksymalne niedoszacowanie [x 10 <sup>-3</sup> m/s²]	62,75	261,04	32,14	244,45	35,35	33,16	282,90	57,19	20,53	
Maksymalne przeszacowanie [x 10 <sup>-3</sup> m/s <sup>2</sup> ]	30,92	32,76	14,53	57,73	15,96	37,92	112,92	36,88	29,88	
			Мо	odel 2						
Błąd średniokwadratowy [x 10 <sup>-3</sup> m/s²]	3,61	11,73	6,46	14,25	4,21	5,74	10,13	24,46	7,45	
Współczynnik korelacji	0,999	0,992	0,999	0,995	0,999	0,998	0,998	0,95	0,95	
Maksymalne niedoszacowanie [x 10 <sup>-3</sup> m/s <sup>2</sup> ]	6,41	33,48	16,05	35,07	9,22	13,54	19,85	64,35	11,17	
Maksymalne przeszacowanie [x 10 <sup>-3</sup> m/s <sup>2</sup> ]	7,14	17,17	12,31	0,40	6,02	6,39	12,92	28,39	13,11	

#### 2018 Volume 7 issue 1

W tabeli 8 zestawiono wyniki analizy dokładności odtworzenia zaobserwowanych wartości maksymalnych amplitud przyspieszeń drgań gruntu. Uwzględniono wyniki otrzymane w rezultacie wykorzystania modelu 1 oraz modelu 2. W tabeli 19.8 scharakteryzowano wartości błędu średniokwadratowego odtworzenia zaobserwowanych przyspieszeń drgań, a także wartości współczynnika korelacji pomiędzy obserwowanymi wartościami i prognozowanymi wartościami przyspieszeń drgań. Podano również wartości maksymalnego niedoszacowania oraz przeszacowania zaobserwowanych wartości. Ze względu na wiarygodność odtworzenia pola przyspieszeń drgań, a także bezpieczeństwo obiektów budowlanych, szczególnie istotna jest wartość maksymalnego niedoszacowania wyników obserwacji.

W rezultacie zastosowania do odtworzenia zarejestrowanych przyspieszeń drgań modelu 1 (tabela 8), wartości współczynnika determinacji wyniosły od 0,29 (wstrząs nr 4) do 0,996 (wstrząs nr 3). Oznacza to, że wyznaczonymi równaniami regresji można wytłumaczyć od 29% do 99,6% zaobserwowanej zmienności przyspieszeń drgań gruntu wywołanych rozpatrywanymi wstrząsami. W przypadku wstrząsów numer 2, 4 i 7 stwierdzono stosunkowo duże wartości błędu średniokwadratowego odtworzenia (powyżej 0,08 m/s<sup>2</sup>) i znaczne niedoszacowanie zaobserwowanych wartości przyspieszeń drgań, wynoszące odpowiednio: 0,261 m/s<sup>2</sup>, 0,244 m/s<sup>2</sup> oraz 0,283 m/s<sup>2</sup>.

Odtworzenie wyników obserwacji z wykorzystaniem modelu 2 pozwoliło uzyskać znacznie mniejsze wartości błędu średniokwadratowego (tabela 8). Wartości współczynnika determinacji wynoszą od 0,90 (wstrząsy nr 8 i nr 9) do 0,998 (wstrząsy nr 1, nr 3 i nr 5) – wyznaczonymi równaniami regresji można wytłumaczyć od 90% do 99,8% zaobserwowanej zmienności maksymalnych amplitud przyspieszeń drgań gruntu wywołanych rozpatrywanymi wstrząsami. Znacznie mniejsze są niedoszacowania wartości obserwowanych (poza jednym przypadkiem – wstrząs nr 8), w porównaniu do uzyskanych w rezultacie zastosowania modelu 1.

Wyniki odtworzenia pól przyspieszeń drgań gruntu wywołanych uwzględnionymi w artykule wstrząsami górotworu, z wykorzystaniem modelu 2, przedstawiono na rysunkach 2÷6. Na rysunkach tych naniesiono lokalizację epicentrum wstrząsu, stanowiska sieci obserwacyjnej z podanymi wartościami zarejestrowanych przyspieszeń drgań gruntu [x10<sup>-3</sup> m/s<sup>2</sup>], izolinie obliczonych przyspieszeń drgań gruntu [x10<sup>-3</sup> m/s<sup>2</sup>], a także przebieg głównych zaburzeń tektonicznych.



Rys. 2 Odtworzenie przyspieszeń drgań gruntu [x10<sup>-3</sup> m/s<sup>2</sup>] wywołanych wstrząsem nr 1 (a) oraz wstrząsem nr 2 (b)



Rys. 3 Odtworzenie przyspieszeń drgań gruntu [x10<sup>-3</sup> m/s<sup>2</sup>] wywołanych wstrząsem nr 3 (a) oraz wstrząsem nr 4 (b)



Rys. 4 Odtworzenie przyspieszeń drgań gruntu [x10<sup>-3</sup> m/s<sup>2</sup>] wywołanych wstrząsem nr 5 (a) oraz wstrząsem nr 6 (b)





Rys. 5 Odtworzenie przyspieszeń drgań gruntu [x10-3 m/s<sup>2</sup>] wywołanych wstrząsem nr 7 (a) oraz wstrząsem nr 8 (b)



Rys. 6 Odtworzenie przyspieszeń drgań gruntu [x10-3 m/s<sup>2</sup>] wywołanych wstrząsem nr 9

Analizując kierunki zmniejszonego tłumienia drgań gruntu, wyznaczone dla analizowanych wstrząsów górotworu, można wskazać zaburzenia tektoniczne sąsiadujące z epicentrami tych zjawisk, które przebiegają w przybliżeniu równolegle do kierunków anizotropii tłumienia drgań. Zaburzenia te zostały zaznaczone na rysunkach 2÷6 pogrubioną czarną linią kreskową.

#### PODSUMOWANIE

Przykłady drgań powierzchni terenu wywołanych wstrząsami górniczymi zaprezentowane w artykule potwierdzają celowość uwzględnienia w relacji tłumienia kierunkowości rozchodzenia się drgań. Wykorzystanie prostego modelu, w którym uwzględniony został efekt kierunkowości, pozwoliło zwiększyć dokładność opisu rejestracji drgań gruntu. Analizy przeprowadzono dla wybranych przypadków drgań wywołanych silnymi wstrząsami (o energii sejsmicznej przekraczającej 10<sup>7</sup> J), indukowanymi prowadzonymi robotami górniczymi. Dodatkowo założono, że zjawisko musi być zarejestrowane przez co najmniej 10 stanowisk powierzchniowej sieci obserwacyjnej. W rezultacie zastosowania modelu uwzględniającego anizotropię relacji tłumienia stwierdzono zmniejszenie się wartości błędu średniokwadratowego odtworzenia wyników analizowanych dziewięciu rejestracji przyspieszeń drgań gruntu średnio o 65%, wartość współczynnika korelacji pomiędzy wartościami przyspieszeń drgań zaobserwowanymi i obliczonymi wzrosła średnio o 24%, natomiast wartość niedoszacowania przyspieszeń drgań zmniejszyła się średnio o 64%. Ponadto, stwierdzono przybliżoną, jakościową zgodność pomiędzy kierunkiem najmniejszego tłumienia drgań gruntu i kierunkiem sąsiadującego z epicentrum wstrząsu zaburzenia tektonicznego.

#### LITERATURA

- 1. Angell, I.O. A *Practical Introduction to Computer Graphics*. United Kingdom, The Macmillan Press: 1981.
- 2. Atkinson, G.M., Boore, D.M. Earthquake ground-motion prediction equation for eastern North America. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 2006; 96: s. 2181-2205.
- 3. Bańka, P. Acceleration field of ground vibrations and anisotropy of wave propagation, *Int. J. Min. Mater. Metall. Eng.*, 2015; 1: s. 1-10.
- 4. Boore, D.M., Joyner, W.B. The empirical prediction of ground motion. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1982; 72: s. 43-60.
- 5. Douglas, J. Ground-motion prediction equations 1964-2010. Pacific Earthquake engineering research center. PEER Report, 2011; 102.
- 6. Draper, N.R., Smith, H. Applied Regression Analysis. New York, Wiley: 1966.
- 7. Joyner, W.B., Boore, D.M. Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California Earthquake. Bull. Seismol. Soc. Am., 1981; 71: 2011-2038.
- 8. Ka-Veng Yuen, Gilberto A. Ortiz, Ke Huang. Novel nonparametric modelling of seismic attenuation and directivity relationship. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2016; 311: s. 537-555.
- 9. Lasocki S., Szybiński M., Matuszczyk J., Mirek J., Pielesz A. Prognozowanie drgań powierzchni wywołanych wstrząsami górniczymi – przegląd krytyczny. Materiały Sympozjum Warsztaty 2000, Ustroń Śl., Kraków 29-31 maja 2000, s. 261-279.
- Markowski E., Kornowski J., Zuberek W.M. Podsumowanie i analiza wyników powierzchniowych obserwacji przyspieszeń pochodzących od wstrząsów górniczych z zakładów górniczych zrzeszonych w Bytomskiej Spółce Węglowej S.A. za okres 1998-2000. Polskie Towarzystwo Przyjaciół Nauk o Ziemi Oddział Górnośląski, Sosnowiec 2002.
- 11. Sin-Chi Kuok, Iok-Tong Ng, Ka-Veng Yuen. Study of the attenuation relationship for the Wenchuan M<sub>S</sub> 8.0 earthquake. *Earthquake engineering and engineering vibration*, 2015; 14: s. 1-11.

Data przesłania artykułu do Redakcji: 03.2018 Data akceptacji artykułu przez Redakcję: 04.2018

#### OPIS DRGAŃ POWIERZCHNI TERENU WYWOŁANYCH WSTRZĄSAMI GÓROTWORU UWZGLĘDNIAJĄCY KIERUNKOWOŚĆ TŁUMIENIA DRGAŃ

**Streszczenie:** Sejsmiczność indukowana prowadzonymi robotami górniczymi w wielu przypadkach powoduje silnie odczuwalne drgania powierzchni terenu. W celu rejestracji drgań gruntu występujących na obszarach górniczych kopalń rozbudowywane są sieci stanowisk obserwacyjnych. Dane z tych punktowych obserwacji wykorzystywane są do odtwarzania pól przyspieszeń (prędkości) drgań gruntu na całym obszarze objętym dynamicznymi wpływami wstrząsów górotworu. Niejednokrotnie powszechnie stosowane relacje tłumienia nie umożliwiają uzyskania wystarczającej, z praktycznego punktu widzenia, dokładności opisu wyników obserwacji. W takich przypadkach wykorzystanie relacji tłumienia uwzględniającej kierunkowość rozchodzenia się drgań może pozwolić zwiększyć dokładność odtworzenia przyspieszeń (prędkości) drgań gruntu. W artykule przedstawiono wyniki odtworzenia zarejestrowanych przyspieszeń drgań gruntu wywołanych wstrząsami górotworu, które wystąpiły w obszarze jednej z kopalń GZW. We wszystkich prezentowanych przypadkach stwierdzono występowanie kierunkowości rozchodzenia się drgań. Wyniki obliczeń pokazują, że kierunek mniejszego tłumienia drgań powierzchni terenu jest równoległy do kierunku zaburzenia tektonicznego sąsiadującego z epicentrum wstrząsu generującego te drgania.

**Słowa kluczowe:** sejsmiczność indukowana, relacja tłumienia, kierunkowość rozchodzenia się drgań gruntu

#### DESCRIPTION OF THE SURFACE VIBRATIONS CAUSED BY ROCKMASS TREMORS TAKING INTO ACCOUNT THE DIRECTIVITY OF VIBRATIONS' ATTENUATION

**Abstract:** Seismicity induced by conducted mining works in many cases causes the strongly felt surface vibrations. In order to record ground vibrations occurring in the mining areas, network of observation stations is being expanded. Data from these point observations are used to reproduce acceleration (velocities) fields of ground vibrations over the entire area affected by dynamic impacts of rockmass tremors. Many times, commonly used attenuation relations do not allow to obtain a sufficiently practicable accuracy of the description of the results of observations. In such cases, using the attenuation relationship that takes into account the directivity of the propagation of vibrations may allow to increase the accuracy of the reproduction of ground vibration accelerations (velocities). In the article, the reproduction's results of nee of the GZW mines, are presented. In all cases, the directivity of vibration propagation was observed. The results of the calculations show that the direction of lower surface vibration attenuation is parallel to the direction of the tectonic fault adjacent to the epicenter of the tremor generating these vibrations.

**Key words:** induced seismicity, attenuation relationship, directivity of ground vibrations propagation

**dr hab. inż. Piotr Bańka, prof. PŚ.** Politechnika Śląska Wydział Górnictwa i Geologii ul. Akademicka 2, 44-100 Gliwice, Polska e-mail: piotr.banka@polsl.pl

**Ewelina Lier** FAMUR S.A. ul. Armii Krajowej 51, 40-698 Katowice, Polska e-mail: e\_lier@wp.pl