

## Metoda wyznaczania mapy rozkładu intensywności sejsmicznej $I_{GSI}$ po wystąpieniu silnego wstrząsu pochodzenia górniczego

The method of determining the distribution maps of seismic intensity  $I_{GSI}$  after recording of a strong seismic event induced by mining



*Dr hab. inż. Grzegorz Mutke, prof. GIG \*)*



*Prof. dr hab. inż. Henryk Marczak \*\*)*



*Inż. Filip Mutke \*\*\*)*



*Mgr inż. Adam Barański \*\*\*\*\*)*

**Treść:** W artykule przedstawiono nową metodę wyznaczania izolinii maksymalnych poziomych amplitud prędkości drgań gruntu  $PGV_{Hmax}$  po wystąpieniu silnego wstrząsu pochodzenia górniczego. W procedurze obliczeniowej uwzględniane są nie tylko empiryczne relacje tłumienia wyznaczone dla badanego obszaru oraz amplifikacja, ale również rzeczywiste parametry drgań zarejestrowane podczas wstrząsu przez powierzchniowe stacje sejsmometryczne. Opracowana metoda pozwala na bardziej wiarygodne wyznaczanie map rozkładu stopni intensywności potencjalnych skutków drgań od zaistniałego wstrząsu górniczego (intensywności sejsmicznej), według odpowiednich skal opracowanych dla górnictwa węglowego ( $GSI_{GZWKW}^{2012}$  oraz MSIS-15) i dla górnictwa rud miedzi w LGOM ( $GSI-2004/11$ ). Przedstawiono przykład obliczeniowy dla wstrząsu o energii sejsmicznej  $E=1E8$  J, zaistniałego w kopalni węgla w GZW i stwierdzono bardzo dobrą korelację stopni intensywności sejsmicznej  $I_{GSI-2012}$  wyznaczonych nową metodą, z uszkodzeniami udokumentowanymi w zabudowie powierzchniowej w efekcie oddziaływania przedmiotowego wstrząsu. Mapy intensywności drgań od silnych wstrząsów górniczych, wyznaczone według zaproponowanego algorytmu obliczeniowego, mogą być przydatne dla zakładów górniczych, urzędów miast i gmin oraz sądów powszechnych do ustanawiania stref szkodliwego oddziaływania sejsmicznego na zabudowę powierzchniową.

**Abstract:** The article presents a new method for determining the isolines of the maximum amplitude of vibration velocity,  $PGV_{Hmax}$  after recording a strong seismic event induced by mining. The calculation procedure does not just include only empirical attenuation law determined for the study area and the amplification effects but also the actual ground motion data recorded during the strong mining seismic event by surface seismic stations. The developed method allows for a more reliable determination of maps of the seismic intensity degrees distribution after mining seismic event, according to the respective scales developed for coal mining ( $GSI_{GZWKW}^{2012}$  and MSIS-15) and for copper mining in LGOM ( $GSI-2004 / 11$ ). An example of calculation for the seismic event of energy  $E=1E8$  J using the new method is presented. A very good correlation between degrees of seismic intensity,  $I_{GSI}$  and damage documented in the building after the seismic event was obtained. Maps of seismic intensity of strong mining tremors, designated by the proposed calculation algorithm, can be useful for mining companies, offices of cities and municipal offices and courts for establishing of zones of harmful effects on the building development area.

\*) Główny Instytut Górnictwa, Katowice, \*\*)Instytut Geofizyki PAN, Warszawa, \*\*\*) Katowice, \*\*\*\*\*)Polska Grupa Górnicza, Katowice

**Słowa kluczowe:**

wstrząsy górnicze, intensywność sejsmiczna, algorytm obliczeniowy parametru drgań PGV

**Key words:**

seismic events induced by mining, seismic intensity, computational algorithm of the PGV parameter

**1. Wprowadzenie**

Każdego roku w GZW występuje kilkanaście bardzo silnych wstrząsów o charakterze regionalnym, związanych z dużymi zmianami naprężeń w skorupie ziemskiej, np. naprężeń tektonicznych aktywowanych naprężeniami wywołanymi prowadzoną w sąsiedztwie eksploatacją górniczą. Wstrząsy te charakteryzują się dużą energią sejsmiczną ( $E > 5E7$  J), niskimi częstotliwościami głównej fazy drgań ( $f < 5$  Hz) oraz dużą intensywnością drgań na większym obszarze, nawet w promieniu kilkunastu kilometrów. W strefie epicentralnej dużą intensywność drgań wywołują fale bezpośrednie – głównie fale poprzeczne, natomiast w odległościach dalszych fale powierzchniowe. Obliczenie rozkładu intensywności drgań w oparciu o zastosowanie empirycznych relacji tłumienia wyznaczonych z pomiarów sejsmometrycznych nie jest dla tego typu wstrząsów sprawą prostą. Rozkład drgań zależy nie tylko od energii sejsmicznej, odległości hipocentralnej, amplifikacji drgań przez nadkład warstw o niskich prędkościach propagacji fali „S”, ale również od długości różnego typu fal i czasu ich oddziaływania na obiekty budowlane, ludzi i środowisko przyrodnicze (Trifunac, Brady 1975, Okamoto 1984, Mutke, Dworak 1992, Wald i in. 1999, Lasocki i in. 2000, Marczak 2004, Marczak 2007, Beker 2008, Olszewska 2008, Anderson 2010, Stec, Mutke 2010, Stec, Lurka 2010, Mutke, Chodacki 2010, Chodacki 2013, 2016, Bańka i in. 2016). Oceny intensywności sejsmicznej – skutków oddziaływania wstrząsów górniczych w obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) dokonujemy w oparciu o specjalistyczną skalę empiryczną  $GSI_{GZW}$ -2012 lub jej rozbudowaną wersję europejską MSIIS-2015 (Mutke i in. 2012, Barański i in. 2014, Mutke i in. 2015). Stopnie intensywności sejsmicznej wyznaczone są w tych skalach w oparciu o poziome amplitudy prędkości drgań gruntu ( $PGV_{Hmax}$ ) oraz czas trwania głównej fazy drgań. Każdemu stopniowi intensywności zostały przypisane określone skutki w obiektach budowlanych, w formie opisowej, odrębnie dla budynków w dobrym oraz złym stanie technicznym i o dużym naturalnym zużyciu. Tak więc wyznaczenie obszarów, w których po wstrząsie wystąpiła możliwość uszkodzenia w zabudowie powierzchniowej lub w infrastrukturze technicznej, sprowadza się w głównej mierze do wyznaczenia map rozkładu drgań gruntu  $PGV_{Hmax}$  i na tej podstawie wyznaczenie stopni intensywności sejsmicznej,  $I_{GSI}$ . Głównym celem artykułu jest przedstawienie nowej metody wyznaczania parametrów drgań bezpośrednio po zaistniałym silnym zjawisku sejsmicznym, która może być przydatna dla zakładów górniczych, urzędów gmin i miast oraz sądów powszechnych, do oceny zasięgu stref szkodliwego oddziaływania sejsmicznego w zabudowie powierzchniowej.

**2. Skala  $GSI_{GZWKW}$ -2012**

W GZW do oceny oddziaływania wstrząsów górniczych i wywołanych nimi drgań gruntu na obiekty budowlane, liniowe obiekty infrastruktury podziemnej oraz ludzi, stosuje się Górniczą Skalę Intensywności  $GSI_{GZWKW}$ -2012 (Mutke i in. 2012, Dubiński i in. 2012, Barański i in. 2014). Skala uwzględnia w opisach swoich stopni intensywności sejsmicznej reakcję budynków o najłabszej konstrukcji w obszarze

GZW, z podziałem na budynki w dobrym stanie technicznym oraz budynki o dużym zużyciu i w złym stanie technicznym. Syntetyczny opis stopni intensywności sejsmicznej  $GSI$  przedstawia tab. 1.

Parametry do oceny skutków drgań w skali  $GSI_{GZWKW}$ -2012 to maksymalna pozioma amplituda prędkości drgań i czas trwania głównej fazy drgań.

1. Maksymalna amplituda prędkości drgań poziomych  $PGV_{Hmax}$ , wyznaczona jako wypadkowa poziomego maksimum długości wektora, wyrażona w m/s:

$$PGV_{Hmax} = \max(\sqrt{V_x^2(t) + V_y^2(t)}) \quad (1)$$

gdzie:

$v_x(t)$  – sejsmogram prędkości drgań zarejestrowanych na składowej poziomej x;

$v_y(t)$  – sejsmogram prędkości drgań zarejestrowanych na składowej poziomej y;

Odbiorniki drgań składowych poziomych x i y leżą w jednej płaszczyźnie i są wzajemnie prostopadłe.

2. Czas trwania składowej poziomej prędkości drgań  $t_{Hv}$ .

Czas trwania drgań jest wyznaczany z całki sumy kwadratów składowych poziomych prędkości drgań. Czas trwania oznacza przedział czasu zawarty pomiędzy tymi momentami czasowymi, kiedy intensywność określona wzorem:

$$I_V(t_k) = \int_0^{t_k} (v_x^2(t) + v_y^2(t)) dt \quad (2)$$

osiąga 5% i 95% swojej maksymalnej wartości

gdzie:

$t_k$  – zmienna opisująca zależność intensywności od czasu.

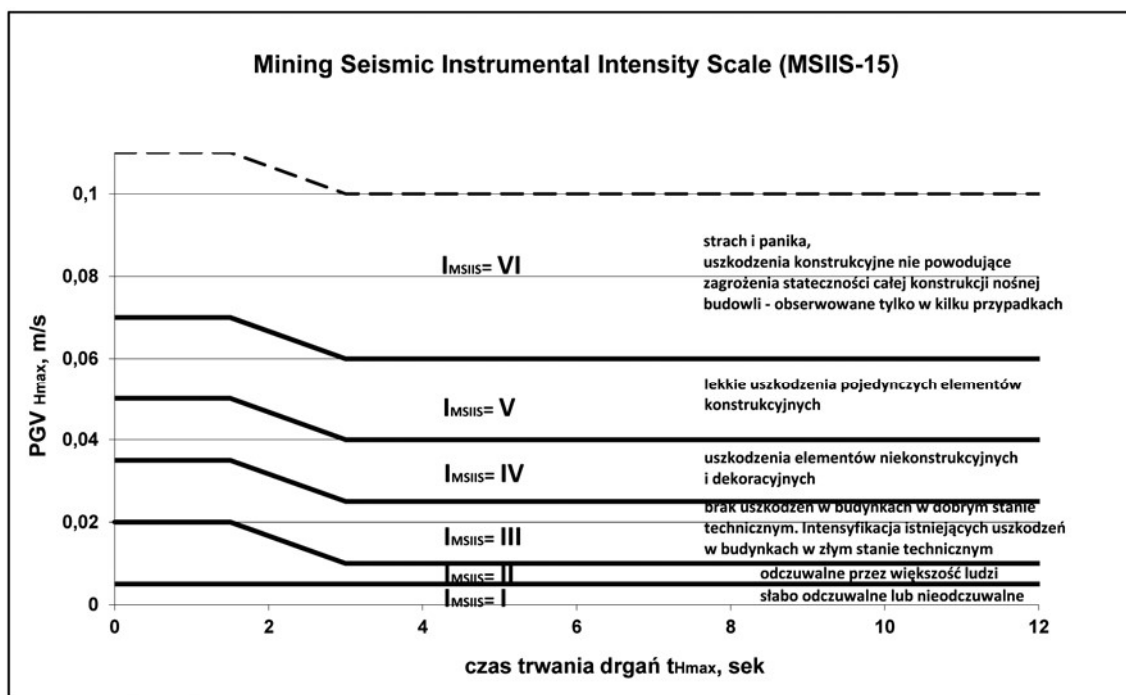
Syntetyczny opis stopni intensywności w skali  $GSI_{GZWKW}$ -2012 przedstawiono w tab. 1.

W ramach realizacji projektu międzynarodowego o akronimie „COMEX”, uwzględniając dodatkowo doświadczenia sejsmiczności indukowanej eksploatacją węgla w zagłębiach niemieckich oraz czeskich, na podstawie skali  $GSI_{GZWKW}$ -2012 opracowano skalę MSIIS-15 o sześciu stopniach intensywności drgań. Wspólne dane pomiarowe pozwoliły uzyskać liczne i wiarygodne informacje o intensywności skutków dla bardzo dużych drgań PGV, na poziomie od 0.050 m/s do ponad 0.100 m/s. Stopnie intensywności sejsmicznej w skali MSIIS-15 przedstawiono na rys. 1. Aktualnie w Głównym Instytucie Górnictwa trwają prace nad opracowaniem wersji Górniczej Skali Intensywności Sejsmicznej (GSIS), kompatybilnej z wersją europejską MSIIS-15. W skali MSIIS-15 numerację stopni rozpoczyna się od intensywności 1, co odpowiada intensywności 0 w skali  $GSI_{GZWKW}$ -2012.

W tym artykule stopnie intensywności sejsmicznej wyznaczano według skali  $GSI_{GZWKW}$ -2012, pozytywnie zaopiniowanej w roku 2012 przez Komisję ds. Ochrony Powierzchni przy WUG do stosowania w kopalniach węgla w GZW (opracowanej dla kopalń dawnej Kompanii Węglowej S.A.).

**Tabela 1. Syntetyczny opis stopni intensywności sejsmicznej  $I_{GSI-2012}$  w skali  $GSI_{GZWKW}-2012$**   
**Table 1. Synthetic description of degrees of mining seismic intensity  $I_{GSI-2012}$  scale  $GSI_{GZWKW}-2012$**

Stopień $I_{GSI-2012}$	PGV <sub>Hmax</sub> , m/s		Odczuwalność drgań	Zakres potencjalnych szkód
	czas $t \leq 1,5s$	czas $t \geq 1,5s$		
0	$\leq 0,005$	$\leq 0,005$	Nieodczuwalne przez ludzi bądź słabo odczuwalne	Nie powodują żadnych szkód
I	0,005 ÷ 0,020	0,005 ÷ 0,010	Silnie odczuwalne przez ludzi wewnątrz budynków, słabo przez ludzi na zewnątrz. Kołysanie wiszących przedmiotów	<i>Budynki w dobrym stanie technicznym:</i> brak uszkodzeń <i>Budynki w złym stanie technicznym:</i> intensyfikacja istniejących rys lub pęknięć
II	0,020 ÷ 0,035	0,010 ÷ 0,025	Wewnątrz budynków drgania są bardzo mocno odczuwalne. Cały budynek lekko się kołysze	<i>Budynki w dobrym stanie technicznym:</i> intensyfikacja istniejących rys lub pęknięć <i>Budynki w złym stanie technicznym:</i> pierwsze uszkodzenia elementów wykończeniowych i niekonstrukcyjnych
III	0,035 ÷ 0,050	0,025 ÷ 0,040	Silnie odczuwalne przez większość ludzi. Wiele wystraszonych wybiega na zewnątrz. Meble mogą się przesuwać. Cały budynek kołysze się	<i>Budynki w dobrym stanie technicznym:</i> uszkodzenia elementów niekonstrukcyjnych <i>Budynki w złym stanie technicznym:</i> uszkodzenia elementów wykończeniowych. Pojedyncze, lekkie uszkodzenia elementów konstrukcyjnych, bez utraty sztywności i nośności budynku.
IV	$> 0,050$	$> 0,040$	Wstrząs bardzo silnie odczuwalny. W górnej granicy intensywności drgań ludzie mają problem z utrzymaniem równowagi. Duże przedmioty spadają z półek i stolików. Ludzie są mocno wystraszeni	<i>Budynki w dobrym stanie technicznym:</i> uszkodzenia elementów konstrukcyjnych, niemających wpływu na nośność budynku. Liczne zarysowania i pęknięcia. <i>Budynki w złym stanie technicznym:</i> wiele lekkich uszkodzeń elementów konstrukcyjnych i niekonstrukcyjnych bez utraty nośności. W górnych wartościach stopnia IV (drgania rzędu 100 mm/s) możliwe są lekkie uszkodzenia konstrukcji nośnej i usztywniającej.



**Rys. 1. Górnicza skala instrumentalnej intensywności sejsmicznej (MSIIS-15) z krótkim opisem potencjalnych skutków drgań w budynkach**

**Fig. 1. Mining Seismic Instrumental Intensity Scale (MSIIS-15) with a brief description the potential effects of vibration in buildings**



### 3. Sposób wyznaczania mapy intensywności drgań po wystąpieniu silnego wstrząsu górniczego

Dotychczas rozkład amplitud prędkości drgań dla najsilniejszych wstrząsów górniczych w GZW (tzw. wstrząsów o charakterze regionalnym), wyznaczano na podstawie wzorów empirycznych (Mutke 1991, Chodacki 2013, Olszewska 2008), uwzględniając wpływ energii sejsmicznej, odległości hipocentralnej oraz amplifikacji drgań na prognozowane wartości amplitud  $PGV_{H_{max}}$ . Następnie na podstawie mapy  $PGV_{H_{max}}$  wyznaczano mapę stopni intensywności sejsmicznej,  $I_{GSI-2012}$  oddziaływania wstrząsów na środowisko powierzchniowe według skali  $GSI_{GZW}-2012$ . Mapy takie, ze względu na złożoność zjawiska propagacji pola falowego oraz zaburzenia obrazu falowego przez złożoną budowę geologiczną i różne formy nieciągłości ośrodka skalnego, mogą znacznie odbiegać od wartości rzeczywistych (rejestrowanych). W celu uzyskania najbardziej wiarygodnych rozkładów parametrów drgań od silnych wstrząsów sejsmicznych zastosowano specjalistyczną metodę obliczania map  $PGV_{H_{max}}$ , polegającą na połączeniu preferowanej informacji o rzeczywistych drganiach z punktowych rejestracji sejsmometrycznych w terenie, z prognozą drgań wyliczoną na podstawie empirycznych relacji tłumienia. Do przedstawionej metody opracowano algorytm obliczeniowy i wykonano przykładowe obliczenia mapy izolinii parametru  $PGV_{H(r)}$  oraz izolinii intensywności drgań  $I_{GSI-2012}$  dla silnego wstrząsu o energii sejsmicznej  $E=1E8$  J z kopalni A. W algorytmie obliczeniowym zastosowano wzory regionalne relacji tłumienia, opracowane dla drgań twardego podłoża w GZW (Mutke 1991). W ostatecznej wersji wyznaczania rozkładu parametru drgań  $PGV_{H(r)}$  uwzględniono również zjawisko amplifikacji oraz rzeczywiste wartości drgań  $PGV_{Hp}(0)$ , pomierzone na pięciu powierzchniowych stacjach sejsmometrycznych, zlokalizowanych w obszarze kopalni A. Do wykonania obliczeń opracowano dedykowany program komputerowy F-PGV zaimplementowany w języku Java, realizujący algorytm obliczający  $PGV_{H(r)}$  w węzłach siatki, pokrywającej obszar kopalni A. Poszczególne kroki obliczeniowe obejmują:

1. Wyznaczenie ze wzoru aproksymacyjnego w węzłach siatki poziomych prędkości drgań podłoża skalnego w funkcji energii sejsmicznej i odległości hipocentralnej (Mutke 1991):

$$V_{MD} = [1,48 * 10^{-3} (\log E)^{1,23} - 0,011] [1,55R^{0,135} \exp(-0,77R) + 0,040] \quad (3)$$

gdzie:

$E$  – energia sejsmiczna wstrząsu, J,  
 $V_{MD}$  – maksymalne poziome amplitudy prędkości drgań skalnego podłoża, m/s,  
 $R^2 = D^2 + h^2$ ,  $D$  – odległość epicentralna, km;  $h$  – głębokość ogniska, km.

2. Wyznaczenie w węzłach siatki aproksymowanych wartości amplitud poziomych prędkości drgań powierzchni terenu,  $PGV_{H_{apr}}$  z uwzględnieniem amplifikacji drgań przez nadkład czwartorzędowy:

$$PGV_{H_{apr}} = V_{MD} \cdot W_f \quad (4)$$

gdzie:

$W_f$  – współczynnik amplifikacji drgań wyznaczony w węzłach siatki gridu.

3. Modyfikację prognozowanych parametrów drgań przez uwzględnienie rzeczywistych pomierzonych wartości składowych poziomych  $PGV_{Hp}(n_i, 0)$  na  $n_i$  stacjach sejsmometrycznych, zainstalowanych w określonych punktach analizowanego obszaru kopalni A. W tym celu wokół każdego punktu pomiarowego na powierzchni (stacji sejsmo-

metrycznej  $n_i$ ), wytyczono obszar o promieniu  $r=250$  m, w którym przyjmowano stałą wartość  $PGV_{Hp}(n_i, 0)$ , jaką zarejestrowano przy pomocy tej aparatury. W przypadku gdy dany węzeł gridu znajdował się w promieniu  $r \leq 250$  m, więcej niż jednej stacji sejsmometrycznej, przyjmowano dla niego wartość zarejestrowaną na stanowisku sejsmometrycznym, które znajduje się najbliższe tego punktu. W przypadku równych odległości od kilku stacji, przyjmowano wartość zarejestrowaną w pierwszej z wprowadzonych (o tych samych odległościach). W odległości  $r$  od stacji sejsmometrycznej  $n_i$  do każdego węzła siatki w analizowanym obszarze kopalni A, wartość drgań  $PGV_H(r)$  aproksymowana była następująco:

$$PGV_H(r)_i = d \cdot PGV_{Hp}(n_i, 0) + (1-d) \cdot PGV_{H_{apr}}(r)_i \quad (5)$$

gdzie:

$PGV_{Hp}(n_i, 0)$  – wartość pomierzona na najbliższym stanowisku sejsmometrycznym  $n_i$  od danego węzła siatki, oddalonym o  $r_i$  od tego węzła,  
 $PGV_{H_{apr}}(r)$  – wartość obliczana ze wzorów aproksymacyjnych (3,4) z uwzględnieniem amplifikacji drgań w węzle siatki gridu zlokalizowanym w odległości  $r_i$  od punktu obserwacyjnego (stacji sejsmometrycznej,  $n_i$ ),

$n_i$  – stacje sejsmometryczne;  $i$  – liczba naturalna odwzorowująca kolejne stacje sejsmometryczne, w zakresie od  $i=1$  do liczby stacji,

$r_i$  – odległość punktu (węzła siatki gridu), dla którego obliczane jest  $PGV_H(r)_i$ , od stacji sejsmometrycznej  $n_i$ ,

$d$  – współczynnik (bezwymiarowy);  $d = 250/r_i$  dla  $r_i > 250$  m;  $d = 1$  dla  $r_i \leq 250$  m.

Można zastosować inną procedurę modyfikacji parametrów drgań przez uwzględnienie rzeczywistych pomierzonych wartości składowych poziomych drgań  $PGV_{Hp}(n_i, 0)$  na  $n_i$  stanowiskach w obszarze kopalni A. W opisanej wyżej i zastosowanej do obliczeń procedurze uwzględniano w aproksymacji amplitud prędkości drgań w każdym węzle siatki wartości pomierzone na najbliższym stanowisku sejsmometrycznym. Innym sposobem jest uwzględnienie w każdym punkcie obliczeniowym gridu wagowanych wartości  $PGV_{Hp}(n_i, 0)$ , od każdego pomiaru rzeczywistego, wykonanego na stanowiskach  $n_i$  zlokalizowanych w obszarze kopalni A, (Marczak 2014). Wówczas we wzorze (5) pierwszy człon po prawej stronie równania powinien być wyrażony przez średnią wartość z sumy tego wyrażenia dla wszystkich  $n_i$  stacji sejsmometrycznych:

$$\sum_1^i \frac{d \cdot PGV_{Hp}(n_i, 0)}{n_i} \quad (6)$$

W przypadku małej liczby sejsmometrycznych stacji pomiarowych i dużych różnic w wartościach zarejestrowanych amplitud  $PGV_{H_{max}}$ , sposób wykorzystujący wszystkie rejestracje, wagowane w każdym punkcie siatki, będzie lepiej odwzorowywał rozkład izolinii drgań.

### 4. Pomierzone parametry drgań wstrząsu z kopalni A o energii $E=1E8$ J

Do weryfikacji zaproponowanego sposobu wyznaczania map intensywności drgań po wystąpieniu wstrząsu sejsmicznego z uwzględnieniem rzeczywistych rejestracji w miejscach

**Tabela 2. Parametry i intensywność drgań dla wstrząsu o energii sejsmicznej  $E = 1E8$  J zarejestrowane na pięciu stacjach sejsmometrycznych w obszarze kopalni A**

**Table 2. The vibration and seismic intensity for the mining tremors of seismic energy  $E = 1E8$  J recorded at five seismic stations in the area of mine A**

Numer stacji pomiarowej	Odległość epicentralna [m]	$PGA_{H10}$ [ $m/s^2$ ]	tHa [s]	$PGV_{Hmax}$ [m/s]	$t_{Hv}$ [s]	Intensywność $GSI_{GZWKW-2012}^{I,II}$
n1	115	1,711	0,63	0,0554	0,71	IV
n2	722	0,534	2,51	0,0159	2,51	II
n3	761	1,095	2,06	0,0304	2,1	II
n4	1100	0,542	1,88	0,0205	2,39	II
n5	5193	0,025	9,72	0,0012	9,99	0

obserwacji pomiarowych, wybrano silny wstrząs o energii sejsmicznej  $E=1E8$  J z obszaru kopalni A. Wstrząs ten był najsilniejszym zjawiskiem sejsmicznym w obszarze kopalni A i charakteryzował się największymi parametrami drgań zarejestrowanymi w tej kopalni. Wartości pomierzonych parametrów drgań na poszczególnych pięciu stacjach sejsmometrycznych przedstawia tab. 2.

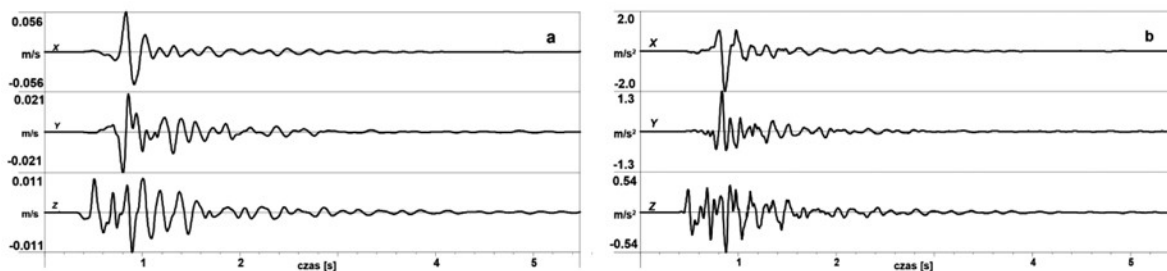
Na rysunku 2 przedstawiono zarejestrowany sejsmogram prędkościowy i akcelerogram wstrząsu na stacji sejsmometrycznej *n1*, zlokalizowanej w strefie epicentrum (odległość epicentralna  $D=115$  m), gdzie wartość pikowej amplitudy prędkości drgań wyniosła  $PGV=56$  mm/s, a pikowej amplitudy przyspieszenia drgań,  $PGA=2.0$  m/s<sup>2</sup>, natomiast czasy trwania głównej fazy drgań były bardzo krótkie (niemal impulsowe wymuszenie związane z falą S). Wartości poziomych amplitud prędkości  $PGV_{Hmax}=0.055$  m/s oraz poziomych przyspieszeń drgań w paśmie do 10 Hz,  $PGA_{H10}=1.711$  m/s<sup>2</sup> były bardzo wysokie jak dla wstrząsu o energii sejsmicznej  $E=1E8$  J i nie były to wartości możliwe do wyznaczenia w oparciu jedynie o wzory empiryczne. W takich przypadkach dodatkowe informacje o rzeczywistych, pomierzonych parametrach drgań pozwalają na dużo bardziej wiarygodne wyznaczenie izolinii  $PGV$  lub  $PGA$ . Należy zwrócić uwagę, że niemal przy identycznej odległości epicentralnej stacji pomiarowych *n2* i *n3*, amplitudy drgań  $PGA_{H10}$  oraz  $PGV_{Hmax}$  różnią się dwukrotnie. Przyczyną tej rozbieżności nie jest ani czynnik energii sejsmicznej ani odległości epicentralnej.

## 5. Wyznaczenie map prędkości drgań i intensywności sejsmicznej $I_{GSI-2012}$ oraz dyskusja wyników

Pierwszą mapę  $PGV_{Hapr}$  dla wstrząsu o  $E=1E8$  J wyznaczono w oparciu o wzory 3 i 4, czyli jest to mapa drgań oparta wyłącznie na regionalnym wzorze aproksymacyjnym relacji tłumienia z uwzględnieniem amplifikacji drgań (rys. 3a). Na

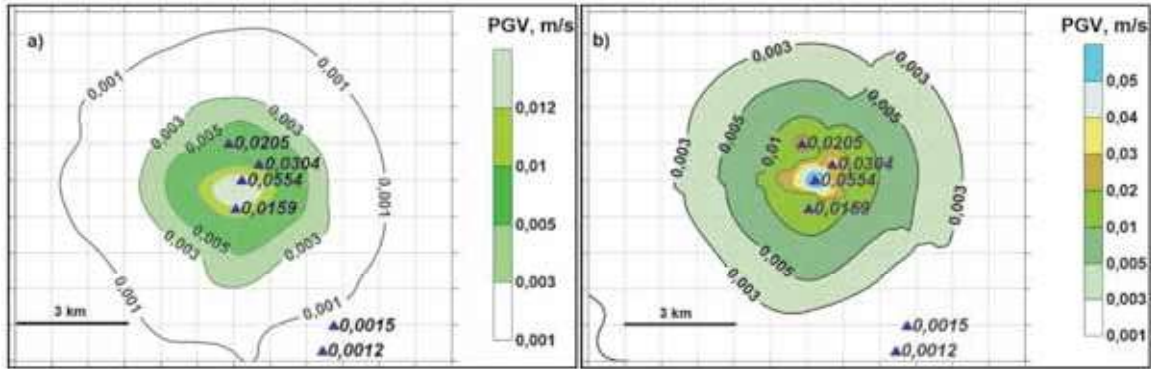
podstawie wyników obliczeń według wzoru (5) wykreślono z kolei mapę rozkładu izolinii prędkości drgań  $PG_{VH}(r)$ , uwzględniając wyniki rzeczywistych pomiarów drgań  $PGV_{Hp}$  na pięciu stacjach sejsmometrycznych przedstawionych w tab. 2 (rys. 3b). Na mapach zaznaczono rzeczywiste wartości zarejestrowanych amplitud drgań  $PGV_{Hp}$ . Na rys. 2a widoczne są duże różnice wartości aproksymowanych z relacji tłumienia (maksymalne wyliczone wartości amplitud  $PGV_{Hapr} = 12$  mm/s) z wartościami pomiarowymi (maksymalne zarejestrowane wartości amplitud  $PGV_{Hp} = 56$  mm/s). Różnica w strefie epicentralnej jest niemal 5-krotna. Z kolei na mapie z rys. 3b, zauważamy bardzo dobrą zgodność wartości obliczonych  $PGV_{H}(r)$  z wartościami pomierzonymi dla analizowanego wstrząsu na poszczególnych stacjach sejsmometrycznych,  $PGV_{Hmax}(ni,0)$ . Największe wyliczone amplitudy prędkości drgań  $PGV_{H}(r) = 0,056$  m/s są zgodne z zarejestrowanymi na stacji powierzchniowej *n1*. Również wyniki czterech pozostałych rejestracji sejsmometrycznych zgadzają się z wartościami obliczonymi, co oznacza, że zastosowana metoda pozwala na prawidłowe uwzględnienie zarówno efektów tłumienia i amplifikacji drgań, jak również efektów związanych z zaburzeniem drgań przez złożoną budowę geologiczną i nieciągłości w formie uskoków w warstwach geologicznych.

Mapę intensywności sejsmicznej  $I_{GSI-2012}$  według skali  $GSI_{GZWKW-2012}$  (tab. 1) wyznaczono w oparciu o wartości amplitud  $PGV_{H}(r)$ , przedstawione na mapie, rys. 3b. Wyniki obliczeń stref intensywności sejsmicznej  $I_{GSI-2012}$  wraz z zaznaczonymi na mapach pomiarowymi wartościami drgań  $PGV_{Hp}$ , przedstawiono na rys. 4a. W strefie epicentralnej intensywność sejsmiczna  $I_{GSI-2012}$  osiąga IV stopień. Na rysunku 4b przedstawiono interpretację intensywności sejsmicznej  $I_{GSI-2012}$  dla rejestracji ze stanowiska *n1*, na którym zarejestrowano największe amplitudy drgań  $PGV_{Hp}=0.056$  m/s. Dla tej rejestracji intensywność sejsmiczna  $I_{GSI-2012}$  również osiąga IV stopień. Odczyty z mapy (rys. 4a) i z obliczeń stopnia intensywności wstrząsu na stanowisku *n1* (rys. 4b) pokazują,



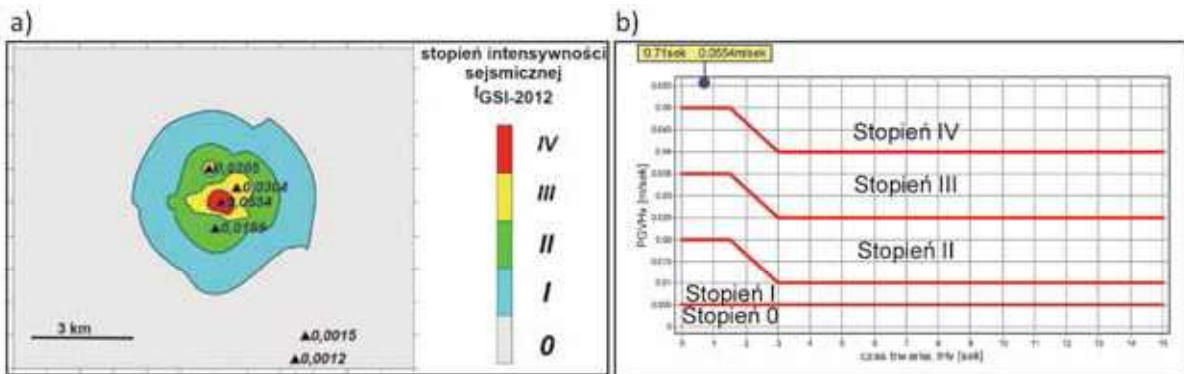
**Rys. 2. Sejsmogram prędkościowy ( $PGV=0.056$  m/s) - (a) i akcelerogram ( $PGA=2.0$  m/s<sup>2</sup>) - (b), zarejestrowane w strefie epicentralnej dla wstrząsu o energii sejsmicznej  $E=1E8$  J w odległości epicentralnej  $D=115$  m**

**Fig. 2. Velocity vibration ( $PGV=0.056$  m/s) - (a) and acceleration ( $PGA=2.0$  m/s<sup>2</sup>) - (b), recorded in epicentral zone for mining tremor with seismic energy  $E=1E8$  J**



Rys. 3. Mapa amplitud prędkości drgań PGV wyznaczona po wystąpieniu wstrząsu o energii sejsmicznej  $E = 1E8$  J z kopalni A: a) – wyłącznie na podstawie empirycznych wzorów na relacje tłumienia,  $PGV_{Hapr}$  b)- z uwzględnieniem rzeczywistych rejestracji drgań na pięciu stacjach sejsmometrycznych,  $PGV_H(r)$

Fig. 3. Map of the PGV velocity vibration determined after the seismic event of energy  $E = 1E8$  J in the mine A: a) - solely on the basis of empirical attenuation relationships  $PGV_{Hapr}$ ; b) – using the real value of the PGV vibration recorded on five seismic stations,  $PGV_H(r)$



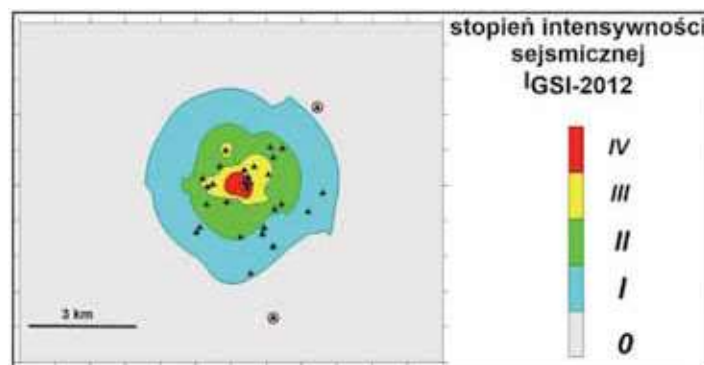
Rys. 4. Mapa stref intensywności drgań  $I_{GSI-2012}$  wyznaczona w oparciu o nową metodę obliczania amplitud prędkości  $PG_{VH}(r)$  - (a); Interpretacja intensywności drgań dla wstrząsu zarejestrowanego na stanowisku sejsmometrycznym  $n1$  - (b)

Fig. 4. Map of seismic intensity zones  $I_{GSI}$  computed on bases of the new proposed method - (a); Interpretation of the seismic intensity  $I_{GSI}$  of the seismic record at seismic station No.  $n1$  - (b)

że intensywność sejsmiczna  $I_{GSI-2012}$  wyznaczona z mapy prędkości drgań obliczonej według nowej metody jest zgodna z intensywnością wyznaczoną w miejscach rejestracji drgań przez zainstalowaną aparaturę sejsmometryczną.

Mapę intensywności drgań obliczoną nową metodą po-

równano z miejscami posadowienia budynków, dla których udokumentowano uszkodzenia po wstrząsie i stwierdzono dobrą korelację stopni intensywności  $I_{GSI-2012}$  wyznaczonych z obserwacji sejsmometrycznych ze skutkami w tych budynkach (rys.5).



Rys. 5. Mapa stref intensywności drgań  $I_{GSI-2012}$  z naniesionymi lokalizacjami budynków, dla których zgłoszono uszkodzenia budynków po wstrząsie – trójkąty. Dwa trójkąty w kółkach to lokalizacja budynków, które zostały uszkodzone z powodu innych przyczyn niż wstrząs

Fig. 5. Map of seismic intensity zones,  $I_{GSI}$  with marked locations of buildings for which the damages were reported after the mining tremors - triangles. Two triangles in circles is the location of the buildings that have been damaged due to reasons other than mining tremor





Rys. 6. Dokumentacja fotograficzna uszkodzonego komina ponad dachem budynku

Fig. 6. Photographic documentation of damaged chimney above the roof of the building

Po wstrząsie odnotowywano prawie wyłącznie powiększenie się lub powstawanie nowych uszkodzeń w postaci zarysowań i niewielkich pęknięć tynków, odspojenia wypraw malarskich i fragmentów tynków, poluzowań dachówek (rys. 6), na połączeniach płyt żelbetowych i w ścianach zewnętrznych itp. (łącznie zarejestrowano 32 zgłoszenia o uszkodzeniach budynków). W jednym przypadku odnotowano spękanie i rozsypanie się fragmentu komina (w części ponad dachem), jednak udokumentowano, że komin ten był w bardzo złym stanie technicznym już przed zaistniałym wstrząsem (rys. 6). Przegląd budynków wykazał, że po analizowanym wstrząsie o energii sejsmicznej  $E=1E8\text{ J}$  i zarejestrowanych, na stanowisku sejsmicznym zlokalizowanym w obszarze epicentralnym, bardzo dużych wartościach prędkości drgań,  $PGV_{H10} \sim 0.056\text{ mm/s}$  oraz przyspieszenia drgań,  $PGA_{H10} \sim 1.711\text{ m/s}^2$ , nie odnotowano uszkodzeń zagrażających bezpieczeństwu konstrukcji obiektów. Na dwa wykazane (w zestawieniu zbiorczym) niewielkie uszkodzenia elementów konstrukcyjnych – jedno dotyczyło niewielkich powiększeń uszkodzeń ścian zewnętrznych, a drugie dotyczyło uszkodzenia komina (konstrukcji samonośnej), będącego w złym stanie technicznym przed wstrząsem. Budynki te znajdowały się w III stopniu intensywności drgań, i obserwowany w nich zakres uszkodzeń pozytywnie weryfikuje wiarygodność wskazań skali  $GSI_{GZWKW-2012}$ . Z analizy mapy (rys. 5) wynika ponadto, że dwa budynki (z 32 zgłoszonych jako uszkodzone) znalazły się w strefie 0 stopnia intensywności drgań, czyli w strefie, w której nie należało oczekiwać wystąpienia uszkodzeń. Dla tych dwóch budynków wykonana została opinia budowlana (Ekspertryza 2016), w której stwierdza się, że wstrząsy górotworu nie miały związku z obserwowanymi uszkodzeniami w przedmiotowych obiektach. W ekspertryzie dowiedziono innych przyczyn powstania występujących i zgłoszonych uszkodzeń, do których to przyczyn zaliczono między innymi uszkodzenia pochodzenia termicznego od dachu w jednym z budynków oraz nierównomierne osiadanie drugiego budynku wybudowanego na zboczu o nachyleniu  $8^\circ$  i w konsekwencji wychyleniu z pionu ściany o  $11\text{ mm/m}$ .

## 6. Podsumowanie

Opracowano nową metodę i algorytm wyznaczania map intensywności drgań po wystąpieniu silnego wstrząsu, uwzględniające w obliczeniach empiryczne relacje tłumienia opracowane dla obszaru badań, amplifikację drgań oraz rzeczywiste parametry zarejestrowane podczas wstrząsu przez powierzchniowe stacje sejsmometryczne.

Wyniki obliczeń wykazują dobrą zgodność wartości obliczonych maksymalnych amplitud prędkości drgań  $PGV_H(r)$  z wartościami pomierzonymi dla analizowanego wstrząsu na poszczególnych stacjach sejsmometrycznych.

Zaprezentowana metoda pozwala na bardziej wiarygodne wyznaczanie map amplitud prędkości drgań PGV i map intensywności drgań  $I_{GSI}$ , ponieważ uwzględnienie kilku rzeczywistych rejestracji sejsmometrycznych w obszarze badań pozwala lepiej uwzględnić zjawiska wpływające na parametry drgań, takie jak:

- mechanizm wstrząsu i związana z nim kierunkowość emisji fal sejsmicznych,
- pojawienie się fal powierzchniowych poza strefą epicentralną,
- amplifikacja topograficzna w strefach uskoku,
- procesy dyfrakcji fal sejsmicznych związane z lokalnymi strukturami geologiczno-tektonicznymi,
- ogniskowanie promieni sejsmicznych oraz fale kanałowe występujące w określonych warunkach budowy geologicznej podłoża.

Mapę intensywności sejsmicznej  $I_{GSI-2012}$  obliczoną nową metodą porównano z miejscami posadawienia budynków, dla których udokumentowano uszkodzenia po analizowanym wstrząsie i stwierdzono dobrą korelację wyznaczonych stopni intensywności z uszkodzeniami zaistniałymi w tych budynkach (rys. 4a).

**Publikacja częściowo finansowana z badań statutowych Głównego Instytutu Górnictwa o numerze 11207156-120.**

## Literatura

- ANDERSON J.G. 2010 - Source and site characteristics of earthquakes that have caused exceptional ground accelerations and velocities. BSSA, vol. 100, No 1., pp. 1–36.
- BAKER J.W. 2008 - An Introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA), p.77.
- BAŃKA P., KOŁODZIEJCZYK P., LIER E. 2016 - Wykorzystanie wyników pomiarów parametrów drgań gruntu do wyznaczenia wartości współczynnika amplifikacji drgań. „Przeгляд Górnicy” nr 4, s.71.
- BARAŃSKI A., KLOC L., KOWAL T., MUTKE G. 2014 - Górnicza Skala Intensywności Drgań GSIGZWKW-2012 w odniesieniu do odporności dynamicznej budynków. „Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie” nr 6, s. 3-10 i nr 11, s. 32-33.
- CHODACKI J. 2013 - Prognozowanie i ocena intensywności drgań wywołanych wstrząsami górnictwymi dla obszaru GZW w oparciu o skalę GSI, rozprawa doktorska, GIG, s.175.
- CHODACKI J. 2016 - New ground motion prediction equation for peak ground velocity and duration of ground motion for mining tremors in Upper Silesia. Acta Geophysica, vol. 64, no 6, pp. 2449-2470. DOI:10.1515/acegeo-2016-0109.
- DUBIŃSKI J., MUTKE G., STEC K., LURKA A., BARAŃSKI A. 2012 - Zasady stosowania zweryfikowanej górnictwowej skali intensywności drgań GSIGZWKW-2012 do prognozy i oceny skutków oddziaływania wstrząsów indukowanych eksploatacją złóż węgla kamiennego w zakładach górniczych kompanii węglowej S.A. na obiekty budowlane i ludzi (wersja opiniowana przez Komisję do spraw Ochrony Powierzchni przy WUG), Kompania Węglowa S.A. Materiały niepublikowane.
- Ekspertryza SITG: Opinia budowlana dotycząca budynków mieszkalnych położonych w Markłowicach przy ul. P. Musioła i w Rybniku przy ul. Hożej ustalająca związek przyczynowo-skutkowy między wstrząsami terenu górnictwowej a uszkodzeniami budynków. Grupa Rzeczoznawców SITG, Zarząd Oddziału w Rybniku. Rzeczoznawca wiodący – dr hab. inż. Krzysztof Gromysz, 2016. Materiały niepublikowane.
- LASOCKI S., SZYBIŃSKI M., MATUSZCZYK J., MIREK J., PIELESZ A. 2000 - Prognozowanie drgań powierzchni wywołanych wstrząsami górnictwymi – przegląd krytyczny. Materiały Sympozjum Warsztaty 2000, Ustroń, Kraków, s. 261-279.
- MARCAK H. 2004 - Modele sygnałów sejsmometrycznych zarejestrowanych

- na terenach górniczych. Materiały Sympozjum Warsztaty Górnicze, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Bełchatów.
- MARCAK H. 2007 - Wpływ niejednorodności w pionowej strukturze nadkładu górnictwa na strukturę zapisów sejsmometrycznych. Prace Naukowe GIG nr III, s. 297-317.
- MARCAK H. 2014 Wyznaczanie intensywności drgań w oparciu o rejestracje sejsmologiczne. Opracowanie na zlecenie GIG. Praca niepublikowana.
- MUTKE G. 1991 - Metoda prognozowania parametrów drgań podłoża generowanych wstrząsami górnictwami w obszarze GZW. Rozprawa doktorska, Główny Instytut Górnictwa - Katowice.
- MUTKE G., CHODACKI J. 2010 - Charakterystyka parametrów drgań od najsilniejszych wstrząsów regionalnych w GZW w aspekcie kryteriów oceny intensywności w oparciu o skalę GSIGZW. W: Mutke G., Tatar T. (red). Wstrząsy górnictwa charakterystyka parametrów drgań oraz kryteria oceny wpływu na obiekty budowlane. Prace Naukowe GIG, „Górnictwo i Geologia” nr 4/4, s. 65-80.
- MUTKE G., CHODACKI J., MUSZYŃSKI L., KREMERS S., FRITSCHEN R. 2015 - Mining Seismic Instrumental Intensity Scale MSIS-15 – verification in coal basins. AIMS 2015 - Fifth Int. Symp.: Mineral Resources and Mine Development. RWTH Aachen University. Vol 14, pp.551-560. (ISBN 978-3-941277-22-9).
- MUTKE G., DWORAK J. 1992 - Czynniki warunkujące efekt sejsmiczny wstrząsów górnictwami na powierzchniowe obiekty budowlane w obszarze GZW. Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc., M-16 (245).
- MUTKE G., STEC K., LURKAA., CHODACKI J., SIATA R., HOLECZEK G., KURZEJA J. 2012 - Weryfikacja Górnictwej Skali Intensywności Drgań GSIGZWKW, stosowanej w kopalniach Kompanii Węglowej S.A. od sierpnia 2008 roku, w aspekcie oceny skutków oddziaływania wstrząsów górnictwami na obiekty budowlane i na ludzi. Dokumentacja pracy badawczej Głównego Instytutu Górnictwa Nr 58127682-120. Praca niepublikowana.
- OKAMOTO S. 1984 - Introductions to Earthquake Engineering, University of Tokyo Press.
- OLSZEWSKA D. 2008 - Ocena efektów lokalnych i struktury częstotliwościowej sygnałów sejsmometrycznych dla poprawy dokładności prognozy rozprzestrzeniania drgań wzbudzanych wstrząsami górnictwami w LGOM. Rozprawa doktorska, AGH, Kraków.
- STEC K., LURKAA. 2010 Wpływ kierunkowości radiacji fal sejsmicznych wysokoenergetycznego wstrząsu o energii  $1,6 \text{ E}+10 \text{ J}$  na powierzchnię w kopalni węgla brunatnego „Bełchatów”. W: Mutke G., Tatar T. (red). Wstrząsy górnictwa charakterystyka parametrów drgań oraz kryteria oceny wpływu na obiekty budowlane. Prace Naukowe GIG, „Górnictwo i Geologia” s. 101-110.
- STEC K., MUTKE G. 2010 - Prognoza parametrów drgań powierzchni do oceny intensywności oddziaływania wstrząsów górnictwami z wykorzystaniem skali GSIGZW. Prace Naukowe GIG, „Górnictwo i Środowisko” nr 4/1, s. 322-337.
- TRIFUNAC M.D., BRADY A.G. 1975 - A study on the duration of strong earthquake ground motion. Bull. Seism. Soc. Am., 65, (3), s. 581-626.
- WALD, D.J., QUITORIANO, V., HEATON, T.H., AND KANAMORI, H. 1999 - Relationship between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity in California: Earthquake Spectra, v. 15, no. 3, s. 557-564.

Artykuł wpłynął do redakcji – październik 2016  
Artykuł akceptowano do druku 15.01.2017