

Wyznaczanie względnych współczynników amplifikacji dla wartości szczytowych przyspieszenia drgań gruntu w oparciu o relację tłumienia dla wybranego rejonu GZW

Michał Gierlotka, Krzysztof Misz, Adam Rozmus

1. Wstęp

Prowadzonej eksploatacji węgla kamiennego często towarzyszą wstrząsy górotworu wywołujące odczuwalne na powierzchni terenu drgania, które mogą powodować uszkodzenia obiektów budowlanych. Są także przyczyną dyskomfortu mieszkańców terenów narażonych na ich oddziaływanie. Kopalniane stacje geofizyki górniczej prowadzą monitoring sejsmiczny za pomocą specjalistycznej aparatury rejestrującej przyspieszenia i prędkości drgań gruntu [5, 10]. Z uwagi na ograniczenia ekonomiczne i techniczne nie jest możliwa ciągła rejestracja drgań gruntu we wszystkich obiektach objętych dynamicznymi wpływami wstrząsów. Realizowany w odpowiednio długim czasie monitoring jest podstawą do opracowania empirycznych zależności, określanych jako relacje tłumienia, na podstawie których wykonywana jest ocena wpływu drgań sejsmicznych na budynki lub prognoza ich oddziaływania na środowisko powierzchniowe. Relacja tłumienia jest zależnością wiążącą wybrany parametr drgań gruntu, którym jest szczytowa amplituda prędkości lub przyspieszenia drgań z czynnikami wpływającymi na jego wielkość, takimi jak energia sejsmiczna, odległość od ogniska czy lokalne warunki geologiczne. W literaturze można znaleźć wiele przykładów zastosowań różnych postaci relacji tłumienia wraz z ich modyfikacjami warunkowanymi lokalną sejsmicznością – na przykład [1, 2, 3, 6, 8, 9].

Zróźnicowanie w budowie geologicznej warstw przypowierzchniowych jest ważnym czynnikiem mającym

STRESZCZENIE: Na obszarze górniczym KWK Mysłowice-Wesoła od maja 2007 roku prowadzona jest ciągła rejestracja drgań gruntu pochodzących od wstrząsów indukowanych działalnością górniczą za pomocą trójskładowych stanowisk sejsmometrycznych. W oparciu o zbiór danych sejsmometrycznych uzyskanych z rejestracji wysokoenergetycznych wstrząsów górotworu podjęto próbę wyznaczenia parametrów relacji tłumienia drgań sejsmicznych z uwzględnieniem amplifikacji tych drgań przez przypowierzchniowe warstwy geologiczne. Amplifikacja to efekt zwiększania wartości amplitud drgań sejsmicznych rejestrowanych na powierzchni terenu, zależny od parametrów warstw przypowierzchniowych, takich jak gęstość, miąższość, prędkość propagacji i typ fal sejsmicznych. Do estymacji współczynnika amplifikacji wykorzystano analizę regresji wielokrotnej oraz model relacji tłumienia Joyner'a-Boore'a.

SŁOWA KLUCZOWE: sejsmiczność indukowana, drgania gruntu, współczynnik amplifikacji

DETERMINATION OF SITE AMPLIFICATION FACTORS OF SEISMIC PEAK GROUND ACCELERATION BASING ON ATTENUATION RELATIONS FOR CHOSEN REGION OF THE UPPER SILESIAN COAL BASIN

ABSTRACT: In the area of KWK Myslowice-Wesola, ground vibrations from seismic events induced by mining activity is being continuously monitoring since May 2007 using 3 three – component seismic stations. Based on the seismic data obtained from recording of high-energy tremors an attempt was made to estimate the parameters of seismic attenuation relations, including the site amplification factors related to near-surface geological layers. Site amplification is the effect of increasing the amplitude of seismic vibrations recorded on the surface that is dependent on the parameters of the subsurface layers such as density, thickness, seismic velocity and wave type. To the estimation of site amplification was made by multiple regression analysis based on the Joyner-Boore attenuation model.

KEY WORDS: induced seismicity, ground vibrations, vibration amplifier factor

wpływ na wielkość zarejestrowanych na powierzchni drgań z uwagi na wzrost ich amplitud w stosunku do twardego podłoża, określane jako amplifikacja drgań. Wartość współczynnika amplifikacji wzrasta wraz ze spadkiem prędkości fal sejsmicznych [7]. Występowanie skał słabo związanych lub spękanych także wpływa na wzrost amplitudy drgań. Do analizy wykorzystano powszechnie

stosowany, niezależnie od wielkości źródła, zarówno w odniesieniu do trzęsień ziemi jak i wstrząsów indukowanych działalnością górniczą, model relacji tłumienia Joyner'a-Boore'a [7]. Estymację parametrów relacji tłumienia przeprowadzono metodą regresji wielokrotnej [4,11]. Do obliczeń wykorzystano zarejestrowane parametry drgań gruntu z okresu od maja 2007 roku do grudnia

Tabela 1. Podstawowe informacje o stanowiskach sieci sejsmometrycznej

Nazwa	Lokalizacja	Współrzędne w układzie Sucha Góra		Liczba zarejestrowanych wstrząsów
		X	Y	
Stanowisko 1	ul. 3-go Maja 72d	22611	-15298	414
Stanowisko 2	ul. Kopalniana – Cechownia	25601	-15678	260
Stanowisko 3	ul. Orła Białego 27	24570	-17585	360
Stanowisko 4	ul. Spacerowa – Szyb Waclaw	23837	-15360	296
Stanowisko 5	ul. Plebiscytowa 77a	25904	-17209	144
Stanowisko 6	ul. Kasprowicza 10	27009	-16983	69
Stanowisko 7	ul. Morgowska 2e	23225	-6943	209
Stanowisko 8	ul. PCK 92	25197	-19121	68
Stanowisko 9	ul. Równoległa 17	22147	-16663	85

2023 roku na 9 stanowiskach powierzchniowych, zlokalizowanych na obszarze górniczym KWK Mysłowice-Wesoła.

2. Charakterystyka badanego obszaru oraz zarejestrowana sejsmiczność

Obszar, z którego pochodzą analizowane dane sejsmometryczne znajduje się w obrębie północnego skrzydła niecki głównej Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Jego budowę geologiczną

stanowią warstwy karbońskie przykryte nadkładem utworów czwartorzędowych, a w południowej części także neogenu oraz triasu. Utwory czwartorzędowe pokrywają prawie cały obszar badań, osiągając miąższość do 58 metrów. Utwory neogenu reprezentowane są przez formację mioceniską, a ich grubość zmienia się w przedziale od 7 do 216 metrów. Trias występuje jedynie w południowej części złoża. Miąższość utworów triasowych zmienia się od 3 do

125 metrów. Utwory karbonu reprezentowane są przez warstwy łaziskie, orzeskie, rudzkie, siodłowe oraz porębskie.

Pomiary parametrów drgań gruntu indukowanych działalnością górniczą prowadzone były za pomocą 9 trójskładowych stanowisk sejsmometrycznych. W tabeli 1 przedstawiono lokalizację stanowisk powierzchniowych oraz liczbę zarejestrowanych wstrząsów, zaś na rysunku 1 przedstawiono rozmieszczenie stanowisk aparatury pomiarowej.

W okresie od maja 2007 roku do grudnia 2023 roku na stanowiskach powierzchniowych zarejestrowano łącznie 1905 trójskładowych sejsmogramów przyspieszeń i prędkości drgań gruntu wywołanych 753 wstrząsami o energiach sejsmicznych wynoszących od 1×10^5 J do 3×10^8 J. Wstrząsy te wystąpiły w zróżnicowanych odległościach od stanowisk pomiarowych, zawierających się w przedziale od 196 m do 5534 m. Zarejestrowane szczytowe amplitudy prędkości zawierały się w przedziale od 0,01 mm/s do 52 mm/s. Natomiast wartości szczytowe przyspieszeń drgań gruntu PGA_{10Hz} w paśmie częstotliwości do 10Hz, zmieniały się od 0,29 mm/s² do 1165 mm/s².

3. Relacja tłumienia z uwzględnieniem amplifikacji drgań

Do analizy danych pomiarowych wykorzystano relację tłumienia, która określa zależność pomiędzy wybranym parametrem drgań takim jak szczytowa amplituda prędkości lub przyspieszenia drgań a czynnikami wpływającymi na ich wielkość: energią sejsmiczną, odległością hipocentralną i współczynnikiem amplifikacji drgań dla poszczególnych stanowisk pomiarowych. Do estymacji parametrów relacji tłumienia wykorzystano metodę analizy regresji wielokrotnej [4] oraz model Joyner'a-Boore'a [7]. W ogólnej postaci model ten wyrażony jest przez związek liniowy:

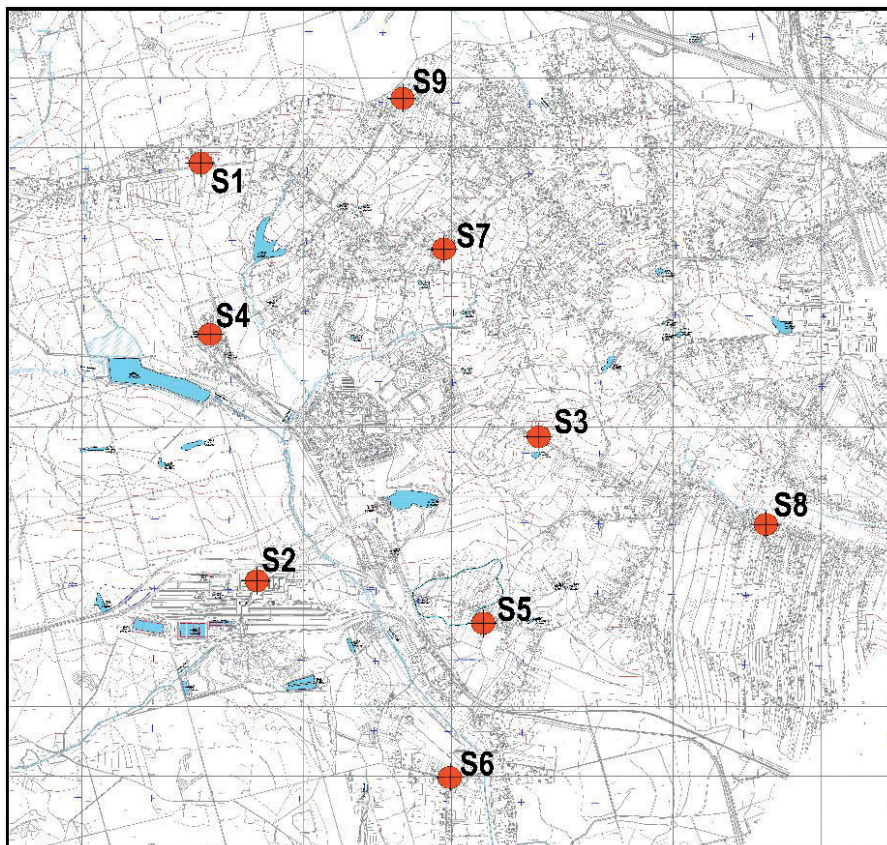
$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 \log E + \alpha_2 \log R + \alpha_3 R + \delta_k S_k + \varepsilon \quad (1)$$

gdzie:

Y – logarytm wartości szczytowej drgań w płaszczyźnie poziomej: PGV_{Hmax} lub PGA_{10Hz}

E – energia wstrząsu,

R – odległość hipocentralna, obliczona



Rys. 1. Rozmieszczenie stanowisk pomiarowych

według zależności $R = \sqrt{r^2 + h^2}$, gdzie r jest odległością epicentralną a h to średnia głębokość wstrząsów równa 650 m, S_k – czynnik określający lokalne warunki geologiczne (k – numer stanowiska, $k=1 \div 9$), wartość ta wynosi 0 jeśli nie uwzględnia się na nim amplifikacji lub 1 jeśli estymujemy współczynnik amplifikacji, $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \delta_k$ – estymowane współczynniki relacji tłumienia.

Po przeprowadzeniu analizy regresji dokonuje się weryfikacji uzyskanego modelu. Sprawdza się między innymi znaki uzyskanych współczynników oraz ich zgodność z założeniami teoretycznymi, które posłużyły do budowy modelu. Ponieważ relacja tłumienia (1) opisuje zmienność szczytowych amplitud drgań sejsmicznych, współczynnik związany z logarytmem energii powinien być dodatni (amplituda drgań wzrasta ze wzrostem energii sejsmicznej), a współczynniki związane z odległością i jej logarytmem powinny być ujemne (amplituda drgań maleje ze wzrostem odległości). Za pomocą odpowiednich parametrów i testów statystycznych sprawdzana jest istotność uzyskanych współczynników. Do oceny jakości otrzymanych modeli służy analiza wartości resztowych, czyli różnic pomiędzy wartościami empirycznymi a teoretycznymi, wynikającymi z oszacowanej funkcji regresji. Reszty powinny mieć rozkład zgodny z rozkładem Gaussa. Nie jest to jednak zawsze konieczne i w przypadku dużej liczby zbieranych obserwacji wystarczającym jest, aby rozkład wartości resztowych nie odbiegał skrajnie od rozkładu normalnego, a weryfikacja normalności rozkładu

Tabela 2. Liczebność próby oraz podstawowe parametry statystyczne dla relacji PGA_{10Hz}

	$\log PGA_{10Hz}$
N (liczebność próby)	1829
R (współczynnik korelacji wielokrotnej)	0,86
R2 (współczynnik determinacji)	0,74
F (wartość statystyki Fishera)	533,64
Wartość p dla testu Fishera	0,0000
SEE (standardowy błąd estymaty)	0,23

reszt może sprowadzić się do wizualnej analizy histogramu reszt lub wykresu normalności. Zebrane dane można także poddać testowi statystycznemu na normalność rozkładu. Rozkład reszt może być zaburzony przez tzw. wartości skrajne, związane z błędami pomiarowymi lub błędami przetwarzania. Dla poprawy modelu regresyjnego z danych usuwa się wartości skrajne i ponownie przeprowadza się analizę regresji. W celu poprawy dopasowania modelu do danych pomiarowych można usunąć do 20% obserwacji.

Do analizy regresji danych sejsmometrycznych z obszaru KWK Mysłowice-Wesoła wykorzystano model, w którym usunięto w obliczeniach współczynnik α_3 , związany z tłumieniem nieelastycznym, z uwagi na niemający fizycznego sensu dodatni znak tego parametru obliczony według modelu (1). W związku z powyższym do dalszych obliczeń wykorzystano model opisany równaniem:

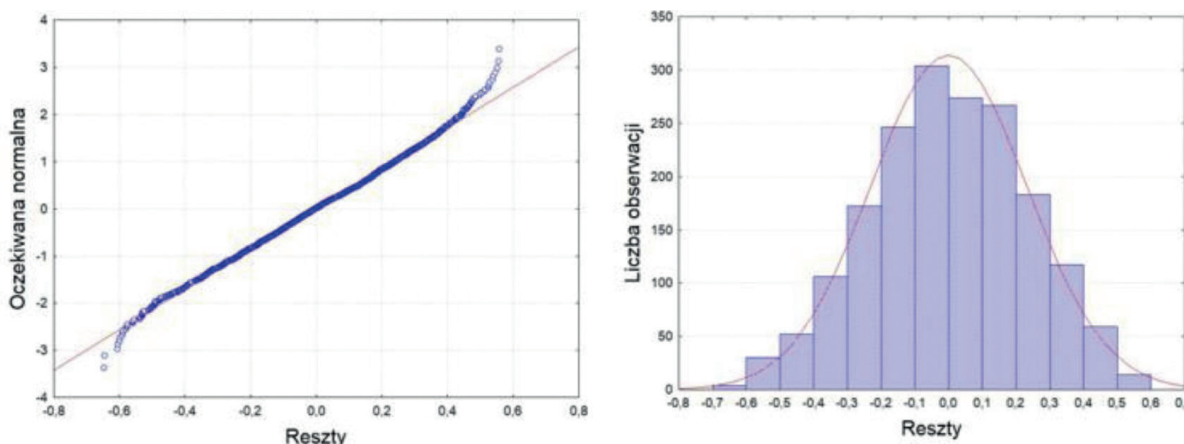
$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 \log E + \alpha_2 \log R + \delta_k S_k \quad (2)$$

gdzie przyjęto oznaczenia tak jak we wzorze (1).

4. Analiza statystyczna relacji tłumienia

Do estymacji współczynników regresyjnych dla relacji tłumienia przyspieszeń drgań PGA_{10Hz} wykorzystano 1829 rejestracji. Współczynnik determinacji wynosi 0,74, co oznacza, że przyjęty model tłumienia w 74% wyjaśnia zmienność danych pomiarowych. Estymator błędów standardowych wynosi 0,23. Testem Fishera sprawdzono czy obliczony model regresyjny różni się istotnie statystycznie od modelu o wartości stałej. Zweryfikowano hipotezę zerową H_0 , zakładając, że wszystkie współczynniki regresji oprócz składowej stałej są zerem. Wyliczona wartość p dla tego testu wyniosła mniej niż 10^{-4} , co pozwala wykluczyć, że uzyskany model jest nieistotny statystycznie. Wartości p testu Fishera oraz pozostałych parametrów statystycznych dla relacji tłumienia PGA_{10Hz} przedstawione zostały w tabeli 2.

W celu wyliczenia współczynników amplifikacji na poszczególnych stanowiskach przyjęto, że jedno z tych stanowisk będzie referencyjne. Dla tego stanowiska wartość współczynnika δ_k wynosi 0, co oznacza, że amplifikacja na tym stanowisku równa się 1.



Rys. 2. Przykładowy wykres normalności reszt (strona lewa) oraz histogram reszt dla przyspieszeń drgań gruntu PGA_{10Hz} (strona prawa)

Tabela 3. Liczebność próby oraz podstawowe parametry statystyczne dla relacji PGA_{10Hz}

	b (współczynniki równania regresji)	Błąd standardowy obliczonych współczynników b	t (wartość statystyki t -Studenta)	p (poziom istotności dla testu t -Studenta)
α_0	5,41172	0,127707	42,3761	0,000000
$\alpha_1 \log E$	0,33045	0,012174	27,1428	0,000000
$\alpha_2 \log R$	-1,75494	0,034429	-50,9726	0,000000
$\delta_1 S_1$	0,10549	0,036009	2,9296	0,003435
$\delta_2 S_2$	0,22558	0,038036	5,9307	0,000000
$\delta_3 S_3$	0,23748	0,036502	6,5060	0,000000
$\delta_4 S_4$	0,08208	0,037636	2,1810	0,029309
$\delta_5 S_5$	0,28253	0,041678	6,7789	0,000000
$\delta_6 S_6$	0,14520	0,048990	2,9639	0,003075
$\delta_7 S_7$	0,09348	0,038759	2,4118	0,015970
$\delta_8 S_8$	0,33328	0,049525	6,7295	0,000000

Określono po 9 modeli regresyjnych, przyjmując za każdym razem inne stanowisko referencyjne. Do oceny istotności poszczególnych współczynników relacji tłumienia (2) wykorzystano test t -Studenta. Testem tym zweryfikowano hipotezę zerową, że jeden z tych współczynników jest zerem. Na podstawie

statystyki Studenta obliczona zostaje wartość prawdopodobieństwa p dla każdego parametru relacji tłumienia. Spośród uzyskanych wyników tylko w jednym przypadku uzyskano wartości p mniejsze od 0,05, co oznacza, że jego współczynniki różnią się istotnie statystycznie od zera. To kryterium spełnione

jest jedynie dla relacji tłumienia, w której przyjęto stanowisko S9 jako referencyjne. Wyniki analizy regresji wielokrotnej relacji tłumienia ze stanowiskiem referencyjnym S9 przedstawiono w tabeli 3.

Po wykonaniu obliczeń przeprowadzono weryfikację uzyskanego modelu za pomocą analizy wartości resztowych.

W pierwszej kolejności sprawdzono, czy reszty posiadają rozkład zgodny z rozkładem Gaussa. W tym celu sporządzono widoczny na rysunku 2 wykres normalności reszt oraz histogram reszt. Wizualna ocena rysunku 2 pozwala stwierdzić, że nie jest całkowicie spełniony postulat normalności rozkładu. Jednak biorąc pod uwagę liczebność próby rzędu 1829, na podstawie centralnego twierdzenia granicznego i twierdzenia Gaussa-Markowa uzyskano najlepsze nieobciążone estymatory liniowego modelu regresji. Reszty powinny układać się wzdłuż prostej, co oznacza, że posiadają rozkład normalny. Podobnej informacji jak wykres normalności dostarcza histogram reszt, który nie odpowiada dokładnie rozkładowi normalnemu. Niewielkie odchylenie od normalności, zwłaszcza dla liczebnie dużych prób, nie wpływa znacząco na uzyskane wyniki. Można zatem przyjąć, że założenie o normalności rozkładu reszt jest spełnione.

Kolejną własnością wartości resztowych, którą należy sprawdzić jest założenie o homoscedastyczności, które oznacza, że wariancja składnika losowego reszt jest taka sama dla wszystkich obserwacji. W tym celu należy stworzyć odpowiedni wykres rozrzutu. Przedstawiony na rysunku 3 zbiór punktów, bez wyraźnej tendencji wzrostu lub spadku wariancji reszt względem wartości przewidywanych wskazuje, że założenie o stałości wariancji składnika losowego jest spełnione.

Ostatecznie relacja tłumienia dla wartości szczytowych przyspieszenia drgań gruntu ze stanowiskiem referencyjnym S9 i wyznaczonymi względnymi współczynnikami amplifikacji ma postać:

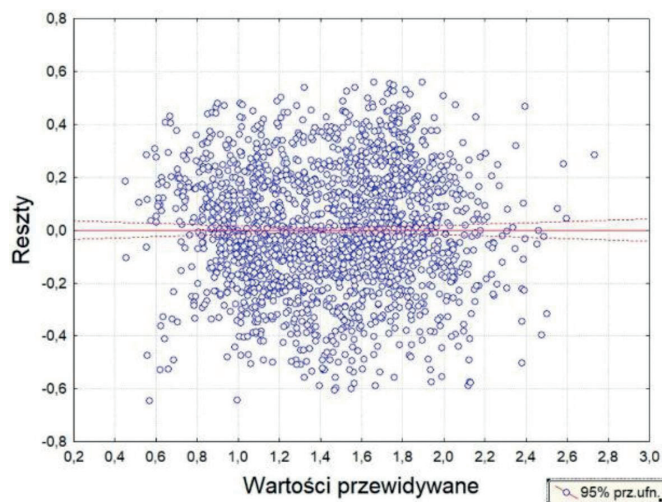
$$\log PGA_{10\text{Hz}} = 5,41172 + 0,33045 \log E - 1,75494 \log R + \delta_k \quad (3)$$

gdzie wartości δ_k podano w tabeli 4.

Estymowane wartości współczynnika δ_k oraz obliczona względna amplifikacja wartości szczytowej przyspieszenia drgań na stanowiskach powierzchniowych zostały przedstawione w tabeli 4.

5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono sposób wyznaczania współczynnika amplifikacji metodą analizy regresji wielokrotnej w oparciu o model relacji tłumienia Joyner'a-Boore'a. Do estymacji



Rys. 3. Przykładowy wykres wartości reszt względem wartości przewidywanych dla przyspieszeń drgań gruntu $PGA_{10\text{Hz}}$

Tabela 4. Estymowane względne współczynniki amplifikacji drgań dla poszczególnych stanowisk powierzchniowych przy założeniu stanowiska S9 jako referencyjnego

Stanowisko pomiarowe	$\log PGA_{10\text{Hz}}$	
	δ_k	Względne współczynniki amplifikacji
S1	0,105	1,27
S2	0,226	1,68
S3	0,237	1,73
S4	0,082	1,21
S5	0,283	1,92
S6	0,145	1,40
S7	0,093	1,24
S8	0,333	2,15
S9	0	1

współczynników amplifikacji wykorzystano dane sejsmometryczne w postaci cyfrowych sejsmogramów przyspieszenia drgań gruntu zarejestrowanych w latach 2007 – 2023 na 9 stanowiskach pomiarowych zlokalizowanych na obszarze górniczym KWK Mysłowice-Wesoła. Estymację współczynników amplifikacji drgań na poszczególnych stanowiskach powierzchniowych wykonano metodą regresji wielokrotnej. Obliczono serię 9 modeli regresji wielokrotnej dla przyspieszeń drgań gruntu, przyjmując za każdym razem inne stanowisko referencyjne o współczynniku amplifikacji równym 1. Do weryfikacji statystycznej wszystkich współczynników 9 modeli relacji tłumienia dla wartości szczytowych przyspieszenia drgań gruntu wykorzystano test t-Studenta. Analiza ta pozwoliła na wybranie jednego modelu, dla których

wyznaczone współczynniki amplifikacji były istotne statystycznie na poziomie istotności $p < 0,05$. Istotnie statystyczny model uzyskano przyjmując stanowisko S9 jako referencyjne. W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano względne wartości współczynników amplifikacji drgań na poszczególnych stanowiskach powierzchniowych. Najmniejsze wartości współczynnika amplifikacji uzyskano na stanowiskach S4 i S1, odpowiednio 1,21 i 1,27. Największe wartości amplifikacji otrzymano na stanowiskach S5 i S8, odpowiednio 1,92 oraz 2,15. Zmienność uzyskanych współczynników wskazuje na różnorodność budowy geologicznej na badanym obszarze. Względne współczynniki amplifikacji drgań mogą zostać przeliczone na wartości bezwzględne, pod warunkiem poprawnego wyznaczenia amplifikacji na stanowisku referencyjnym.

reklama

6. Literatura

- [1] AMBRASEYS N. N. I IN. 2005: *Equations for the estimation of strong ground motion from shallow crustal earthquakes using data from Europe and the Middle East: Horizontal peak ground accelerations and spectra acceleration*. *Bulletin of earthquake Engineering*, (1), pp. 1 – 53.
- [2] BOORE D. M., JOYNER W. B. 1982: *The empirical prediction of ground motion*. *Bulletin of Seismological Society of America*, 72, pp. 43 – 60.
- [3] CAMPBELL K. W. 1981: *Near-source attenuation of peak horizontal acceleration*. *Bulletin of Seismological Society of America*, pp. 2039 – 2070.
- [4] DRAPER N. R., SMITH H. 1973: *Analiza regresji stosowana*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- [5] DUBIŃSKI J., MUTKE G. 2001: *Ocena oddziaływania wstrząsów górniczych na powierzchnię*, „Badania geofizyczne w kopalniach”. Praca zbiorowa pod red. J. Dubińskiego, Z. Pileckiego i W.M. Zuberka. Wyd. IGSMiE PAN. Kraków.
- [6] FREJ A., ZUBEREK W. M. 2008: *Local effects in peak accelerations caused by mining tremors in Bytom Syncline Region (Upper Silesia)*. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, pp. 115 – 122.
- [7] JOYNER W. B., BOORE D. M. 1981: *Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake*. *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 71, No 6, pp. 2011 – 2038.
- [8] LASOCKI S. I IN. 2000: *Prognozowanie drgań powierzchni wywołanych wstrząsami górniczymi – przegląd krytyczny*. Warsztaty 2000 nt. Zagrożenia naturalne w górnictwie, str. 261 – 279.
- [9] LASOCKI S., OLSZEWSKA D. 2017: *Ground motion prediction equations for mining induced seismicity in Legnica Glogow Cooper District in Poland*. 16th World Conference of Earthquake, Santiago Chile, pp. 1 – 13.
- [10] LURKA A., LOGIEWA H. 2007: *Seismologiczny system obserwacji SOS jako nowe narzędzie do obserwacji i interpretacji danych sejsmicznych w górnictwie zagrożonym tąpnięciami*, Katowice, GIG, str. 283 – 296.
- [11] AMPUŁA D. 2015: *Wartości resztowe w procesie regresji*, z.133, nr 1, str 81 – 102.



Michał Gierlotka

PGG S.A. Oddział KWK „Sońnica”

Krzysztof Misz

PGG S.A. Oddział KWK „Mysłowice-Wesoła”

Adam Rozmus

PGG S.A. Oddział KWK „Mysłowice-Wesoła”

artykuł recenzowany