
Dr hab. inż. ZBIGNIEW ZEMBATY, prof. PO,
Prof. dr hab. inż. TADEUSZ CHMIELEWSKI
Politechnika Opolska

Opisowe intensywności trzęsień ziemi i możliwości ich stosowania do oceny wstrząsów górniczych

Polska nie leży na obszarze aktywnym sejsmicznie, jednak polskie środowisko inżynierskie jest zainteresowane problematyką wpływów sejsmicznych na budowlę ze względu na eksport budownictwa za granicę, a także ze względu na wstrząsy górnicze i wybuchy przemysłowe występujące na obszarach Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego i Śląska. Problematyką tą w Polsce zajmuje się m. in. Instytut Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej, organizując cykliczne konferencje i sympozja. Publikacje na ten temat często gościły także na łamach „Inżynierii i Budownictwa”, por. np. [9, 10].

Problemy wpływu podziemnej eksploatacji górniczej na powierzchnie, obiekty budowlane i rozwój sposobów minimalizujących powstające szkody górnicze zostały przedstawione w zbiorowej monografii [11], która jest wynikiem współpracy szerokiego grona polskich specjalistów z różnych instytucji naukowych i przemysłowych.

Tematem niniejszego artykułu jest zagadnienie oceny intensywności wstrząsów górniczych, które choć przypominają do

pewnego stopnia zjawiska sejsmiczne, to jednak różnią się także co do wielu istotnych parametrów.

Definicje, przeznaczenie i historia

Opisowe skale intensywności wstrząsów sejsmicznych sformułowano na przełomie XIX i XX wieku: *Rossi* (1883), *Forel* (1884), *Mercalli* (1902), *Cancani* (1904), *Sieberg* (1923), choć ich udokumentowana historia sięga szesnastego wieku. Krótkie przypomnienie ich historii można znaleźć m. in. w pracach [1, 2]. Spośród różnych propozycji, w praktyce przyjęły się dwie skale dwunastostopniowe: MM – Modified Mercalli (*Wood, Neuman* 1931), MSK-64 – Medvedev-Sponhauer-Karnik (*Medvedev, Sponhauer* 1969), uaktualniana od 1992 roku jako: EMS-92, obecnie EMS-98, a także siedmiostopniowa skala japońska JMA – Japanese Meteorological Agency (*Okamoto*, 1973).

W skalach tych intensywność wstrząsów sejsmicznych ustala się na podstawie opisu skutków tych wstrząsów na budowlę, powierzchnię gruntu, zbiorniki wodne, a także ludzi, ro-

śliny, zwierzęta itp. Szczegółowe opisy tych skal można znaleźć w różnych publikacjach, np. [3, 4]. Współcześnie skala MSK-64 została poddana weryfikacji i od roku 1992 jest używana pod nazwą Europejskiej Skali Makrosejsmicznej – European Macroseismic Scale¹⁾.

Na rysunku 1 [2] przedstawiono przybliżoną zależność między skalami MM, MSK-64 i używaną we Włoszech oraz niektórych innych krajach śródziemnomorskich dwunastostopniową skalą MCS (*Mercali, Cancani, Sieberg*), a także, w celu porównania, skalę japońską. Aby przeliczać intensywności ze skali JMA na MM lub MSK-64 przyjmuje się przybliżoną zależność $I_{MM} = 0,5 + 1,5I_{JMA}$ podaną przez Okamoto.

Opisowe skale intensywności, jak wskazuje ich nazwa, wykorzystują opisy skutków wstrząsów w celu ustalenia przynależności wstrząsów do danej skali. Z tego też względu są to skale bardzo nieprecyzyjne. Pojawia się zatem pytanie: dlaczego się je jeszcze stosuje mimo istnienia wielu mierzalnych parametrów trzęsień ziemi, takich jak np. maksymalne przyspieszenia czy prędkości drgań gruntu? Odpowiedź na to pytanie jest trojakiego rodzaju:

- wstrząsy sejsmiczne występują często na obszarach, na których brak jest sejsmografów, a istnieje potrzeba oceny ich intensywności,

- w celu określenia ryzyka sejsmicznego na danym obszarze istnieje potrzeba badania historycznych zapisów dotyczących trzęsień ziemi, a te są określone tylko opisowo,

- samo zjawisko wstrząsu sejsmicznego jest zdarzeniem, którego efekty na powierzchni i skutki w odniesieniu do obiektów budowlanych nie są do końca mierzalne, ponieważ jego charakter może być bardzo różny, poczynając od wspomnianych różnic wartości szczytowych przyspieszeń przez różny czas trwania wstrząsów, aż po różnorodny charakter rozkładu widmowego drgań ruchu gruntu, zależny od historii propagacji fal sejsmicznych, w tym od lokalnego podłoża gruntowego w miejscu odbioru wstrząsów.

Podczas analizy opisowych skal intensywności nasuwa się też pytanie, po co obecnie dalej drobiazgowo uprecyzyniać te, ze swej natury niezbyt dokładne skale. Cel tych działań jest jednak uzasadniony i wynika z faktu, że intensywności w tych skalach ustala się w dużej mierze na podstawie opisu uszkodzeń konstrukcji budowlanych, a technologia ich wykonania uległa znacznym zmianom w okresie od lat trzydziestych ubiegłego wieku. Innym istotnym problemem jest fakt, że w rejonach aktywnych sejsmicznie pojawiło się wiele obiektów budowlanych specjalnie wzmocnianych na wpływy sejsmiczne, co dodatkowo komplikuje oceny opisowe.

Obecnie prawie na całym świecie (poza Japonią) stosuje się najczęściej dwie skale: MM oraz MSK-64. Drobiazgowo badania porównawcze wskazują, że w zakresie istotnym ze względów inżynierskich (V-IX) obie te skale nie różnią się w sposób znaczący. Na przykład autorzy prac [2] i [1] przyjmują je jako tożsame. Europejska Skala Sejsmiczna EMS-92, która opiera się na skali MSK-64, jako swoją podstawę przyjęła kompatybilność wstecz, co oznacza że wszystkie dawniejsze, prawidłowe i nie budzące wątpliwości przypisania do skali MSK-64 są jednocześnie przypisaniami do skali EMS-92. Uczyniono tak, aby nie rewidować dużego zbioru danych opisanych do tej pory. Oznacza to, że w odniesieniu do większości praktycznych zastosowań inżynierskich w budownictwie dwunastostopniowe skale MM, MSK-64, EMS-92 są takie same. Do nowszej skali EMS-92 będziemy jednak sięgać wtedy, gdy będziemy chcieli klasyfikować szerszy i bardziej precyzyjnie określony zbiór uszkodzeń i innych opisów skutków wstrząsów. Inna 12-stopniowa skala używana do tej pory, włoska skala MCS

MERCALI
CANCANI
SIEBERG

MM
MODIFIED
MERCALI

MSK-64
MEDVEDEV
SPONHEUER
KARNIK

JAPANESE
METEOROLOGICAL
AGENCY

I	i	I	I
II	II	II	
III	III	III	
IV	IV	IV	
V	V	V	
VI	VI	VI	
VII	VII	VII	
VIII	VIII	VIII	
IX	IX	IX	
X	X	X	
XI	XI	XI	
XII	XII	XII	

WOOD AND
NEUMANN (1931)

MEDVEDEV AND
SPONHEUER (1969)

OKAMOTO (1973)

Rys. 1. Ilustracja graficzna zależności między czterema głównymi, opisowymi skalami sejsmicznymi [2]

(*Mercali, Cancani, Sieberg*) w pewnym, choć niewielkim stopniu odbiega od skal MM i MSK-64 (por. rys. 1). Jest ona dostosowana do specyficznych warunków budownictwa w rejonie śródziemnomorskim. Skale MM, MCS, MSK-64 były drobiazgowo weryfikowane z uwzględnieniem lokalnej budowy geologicznej, miejsca obserwacji odległości od epicentrum, maksymalnych przyspieszeń, prędkości i przemieszczeń zapisów ruchu podłoża oraz wielu innych parametrów (por. np. [5]).

Należy podkreślić, że dwunastostopniowe skale intensywności są w praktyce skalami ośmiostopniowymi, gdyż stopnie I-II są albo w ogóle nieodczuwalne, albo za słabe, aby je odróżnić, natomiast stopnie XI-XII są trudne do odróżnienia ze względu na poważne zniszczenia i dużą rozmaitość skutków wstrząsów w strefie blisko epicentrum. Idąc dalej w tych rozważaniach, można uznać, że największe praktyczne zastosowanie mają te skale w zakresie intensywności V-IX, w przypadku których uszkodzenia budowli są najbardziej jednoznaczne do oceny. Jako przykład opisowej skali przytoczono opis intensywności V-IX, wybranych spośród dwunastu stopni skali EMS-98 (stopień IV i niższe nie skutkują żadnymi uszkodzeniami budowli).

• **Stopień V („silny”): a.** Wstrząs „odczuty” we wnętrzach (budynków) przez większość (osób) i niewielu na zewnątrz. Niektóre osoby zostały przestraszone i wybiegły na zewnątrz. Wiele spośród osób śpiących obudziło się. Obserwatorzy odczuwają silny wstrząs lub kołysanie całego budynku, pokoju bądź mebli. **b.** Wiszące przedmioty kołyszą się znacząco. Naczynia porcelanowe i szklanki stukają o siebie. Małe przedmioty ze środkiem ciężkości w górnej części i/lub niepewnie podparte mogły się przesunąć lub przewrócić. Drzwi i okna otwierają się lub zamykają. W kilku przypadkach szyby okienne pękają. Płyty w naczyniach kołyszą się i mogą się wylać z napełnionych do pełna naczyń. Zwierzęta we wnętrzach mogą odczuwać niepokój. **c.** Uszkodzenia stopnia 1. wystąpiły w niektórych budynkach o wrażliwości (na wstrząsy) klasy A i B.

¹⁾ Grunthal G. (editor): European Macroseismic Scale (EMS-98), European Seismological Commission, Luxembourg, 1992–1998.

• **Stopień VI („lekkو uszkadzający”):** a. Wstrząs „odczuty” przez większość (osób) we wnętrzach (budynków) i wielu na zewnątrz. Wiele osób zostało przestraszonych i wybiegło na zewnątrz. b. Małe przedmioty, zazwyczaj pewnie stojące, mogły się przewrócić, a meble mogły się przesunąć. W kilku przypadkach talerze i szklane naczynia mogły się potłuc. Zwierzęta domowe (także na zewnątrz) mogły się wystraszyć. c. Uszkodzenia stopnia 1. wystąpiły na wielu budynkach o wrażliwości (na wstrząsy) klasy A i B. Niewiele budowli klasy A i B doznaje uszkodzeń stopnia 2. Niewiele budowli klasy C doznaje uszkodzeń stopnia 1.

• **Stopień VII („uszkadzający”):** a. Większość ludzi wystraszona i usiłuje wybiec z budynków. Wielu osobom trudno utrzymać równowagę, szczególnie na wyższych piętrach. b. Meble przesunięte, a meble wyższe i ciężkie w górnej części mogły się wyrwać. Przedmioty w dużej liczbie spadają z górnych półek. Woda wylewa się z naczyń, zbiorników i basenów. c. Wiele budynków o wrażliwości na wstrząsy klasy A doznaje uszkodzeń stopnia 3; niewiele stopnia 4. Wiele budynków klasy B doznaje uszkodzeń stopnia 2; niewiele stopnia 3. Niewiele budynków klasy C doznaje uszkodzeń stopnia 2. Niewiele budynków klasy D doznaje uszkodzeń stopnia 1.

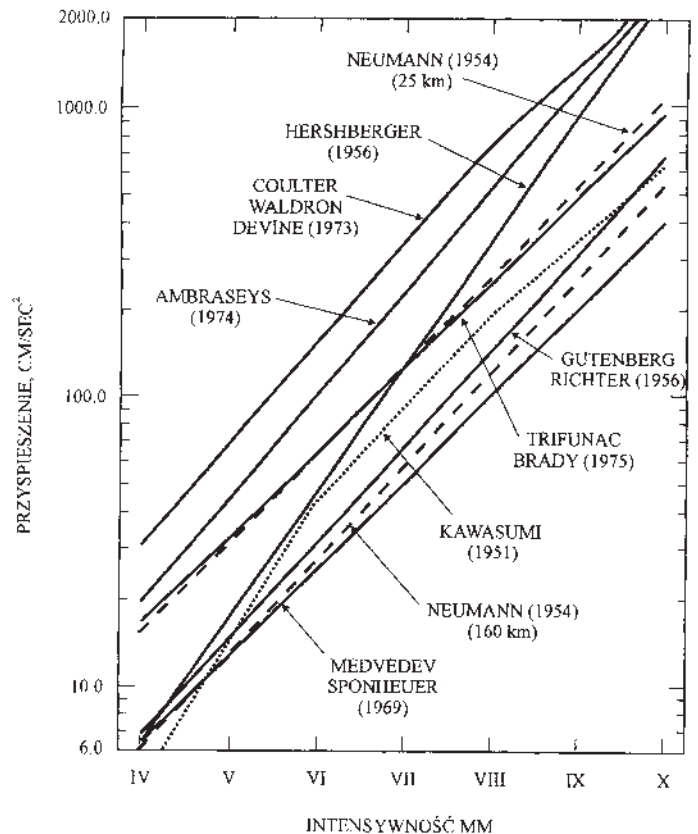
• **Stopień VIII („silnie uszkadzający”):** a. Wielu osobom trudno utrzymać równowagę, nawet na zewnątrz. b. Meble mogą być wyrzucone. Spadają przedmioty takie jak odbiorniki TV, maszyny do pisania itp. Płyty nagrobne mogą być przesunięte, obrócone lub przewrócone. Fale mogły być widoczne na bardzo miękkim gruncie. c. Wiele budynków o wrażliwości na wstrząsy klasy A doznaje uszkodzeń stopnia 4.; niewiele stopnia 5. Wiele budynków klasy B doznaje uszkodzeń stopnia 3.; niewiele stopnia 4. Wiele budynków klasy C doznaje uszkodzeń stopnia 2.; niewiele stopnia 3. Niewiele budynków klasy D doznaje uszkodzeń stopnia 2.

• **Stopień IX („niszczący”):** a. Ogólna panika. Ludzie mogą być przewróceni na grunt. b. Wiele pomników i kolumn przewraca się lub skręca. Widać fale na miękkim gruncie. c. Wiele budynków o wrażliwości na wstrząsy klasy A doznaje uszkodzeń stopnia 5.; wiele budynków o wrażliwości na wstrząsy klasy B doznaje uszkodzeń stopnia 4; niewiele stopnia 5. Wiele budynków klasy C doznaje uszkodzeń stopnia 3.; niewiele stopnia 4. Wiele budynków klasy D doznaje uszkodzeń stopnia 2.; niewiele stopnia 3. Niewiele budynków klasy E doznaje uszkodzeń stopnia 2.

Podział budynków na klasy wrażliwości sejsmicznej (A–F) i opis kolejnych możliwych stopni uszkodzeń (1–5) jest zdefiniowany opisowo i rysunkami na kilkunastu stronach w treści skali EMS-98. Należy tu jedynie zaznaczyć, że kolejne klasy wrażliwości zmieniają się od obiektów najsłabszych, np. wykonanych z nie wypalanej cegły czy murowanych z kamienia (A–B) do różnorodnych konstrukcji żelbetowych, zdefiniowanych w całym przedziale wrażliwości sejsmicznej (A–F) czy konstrukcji stalowych (C–F). Dodatkowo w każdej klasie uwzględnia się konstrukcje, w których zastosowano specjalne wzmocnienia na wpływy sejsmiczne. Kolejne stopnie uszkodzeń (1–5) zmieniają się od trudnych do zauważenia zarysowań tynku i wypraw („hair-like cracks”) w przypadku stopnia 1. do całkowitej katastrofy (zawalenia) budowli opisanej jako stopień 5. Szczegółowy opis stopni uszkodzeń jest inaczej zdefiniowany w odniesieniu do różnych rodzajów obiektów budowlanych i ich systemów konstrukcyjnych (murowanych, żelbetowych, stalowych itp.). Definicje te są przedstawione w formie słownej i rysunkowej, a także udokumentowane fotograficznie.

Korelacje intensywności opisowych z maksymalnymi przyspieszeniami, prędkościami i przemieszczeniami gruntu

Jako najważniejszą, badaną korelację opisowych skal intensywności uznać można zależność między maksymalnymi przyspieszeniami a intensywnością wstrząsów. Na rysunku 2 przedstawiono różne, często historyczne już zależności mię-



Rys. 2. Zależności między intensywnością MM a maksymalnymi przyspieszeniami ruchu podłoża otrzymane przez różnych autorów

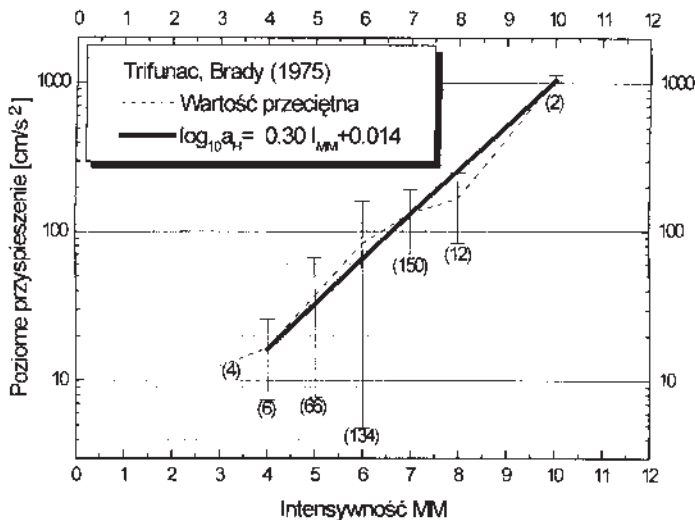
dy intensywnością w skali MM a maksymalnymi przyspieszeniami podłoża zaproponowane przez różnych autorów. Jak widać rozrzut wyników jest bardzo duży. Poważniejsze badania tych zależności rozpoczęły się, gdy pojawił się odpowiednio duży zbiór zarejestrowanych akcelerogramów, wraz z wiarygodnie odnotowanymi ocenami intensywności wstrząsów, czyli od początku lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku. Na rysunku 3 przedstawiono wykres zależności między skalą MM a maksymalnymi, poziomymi przyspieszeniami a_H

$$\log_{10} a_H = 0,30 I_{MM} + 0,014, \quad a = [\text{cm/s}^2], \quad IV \leq I_{MM} \leq X, \quad (1)$$

uzyskanej przez autorów pracy [1]. Wzór ten otrzymano na podstawie statystycznej analizy 187 zapisów trzęsień ziemi. Na rysunku 3 w nawiasach podano liczbę zapisów zakwalifikowanych do danej intensywności, zaznaczono wartość przeciętną (linia przerywana), odchylenia standardowe i wykres funkcji danej wzorem (1) – linia pogrubiona. Dwa lata później autorzy [2] zaproponowali analogiczną zależność opartą na analizie regresji liniowej dla większego zbioru danych (900 zapisów):

$$\log_{10} a_H = 0,25 I_{MM} + 0,25, \quad a = [\text{cm/s}^2], \quad IV \leq I_{MM} \leq X. \quad (2)$$

Z rysunków 2 i 3 oraz wzorów (1) i (2) można wywnioskować, że



Rys. 3. Zależność między maksymalnym, poziomym przyspieszeniem ruchu gruntu a intensywnością wstrząsów w skali MM [1]

a) zależność między logarytmem maksymalnych poziomych przyspieszeń a intensywnością MM w zakresie IV–X jest w przybliżeniu liniowa,

b) przypisania maksymalnych przyspieszeń do danych intensywności wykazują znaczny rozrzut wynoszący od 50 do 90% wartości przeciętnej,

c) zakres intensywności, których dane mogą stanowić statystycznie wiarygodny zbiór, wynosi od V do VIII,

d) posługując się maksymalnymi przyspieszeniami jako kryterium intensywności wstrząsów można z dużym prawdopodobieństwem przypisać zaobserwowane zjawisko sejsmiczne do intensywności o jeden większej lub o jeden mniejszej od wyniku przeciętnego w danym zbiorze obserwacji.

Wzory (1) i (2) otrzymano posługując się zapisami wstrząsów sejsmicznych, w których większość zapisów obejmowała zarejestrowane zjawiska z terenu USA, Japonii i w mniejszym stopniu Europy. W 1974 roku opracowano [6] analogiczną zależność dotyczącą 29 zapisów z terenów Europy (głównie południowej), otrzymując

$$\log_{10} a_H = 0,36 I_{MM} - 0,16, \quad a = [\text{cm/s}^2]. \quad (3)$$

Wzory (1) + (3) stanowią obecnie podstawę większości analiz ryzyka sejsmicznego przeprowadzanych w odniesieniu do różnych obszarów na ziemi przy ustalaniu projektowej intensywności sejsmicznej w planowanym miejscu inwestycji budowlanych, szczególnie gdy nie są ustalone wiarygodne lokalne normatywy sejsmiczne.

Z literaturowych analiz skal intensywności wynika, że o zakwalifikowaniu wstrząsu sejsmicznego do danej intensywności decyduje opis jego skutków zgodnie z odpowiednią charakterystyką ustaloną w danej skali. Analiza korelacji: maksymalne przyspieszenie lub prędkość a intensywność MM wskazuje, że maksymalne przyspieszenia, które można przypisać danym wstrząsom, stanowią jedynie dodatkową, orientacyjną informację, której wiarygodność jest mocno ograniczona. Potwierdzeniem tego jest fakt, że grupa robocza ESC (European Seismological Commission) ustalająca europejską skalę sejsmiczną EMS-92, jak do tej pory, uchyliła się od podania zależności swojej skali od maksymalnych przyspieszeń lub prędkości w ruchu podłoża.

Oprócz poziomych przyspieszeń także są ustalane analogiczne zależności między skalą MM a maksymalnymi przyspieszeniami pionowymi. Pionowe składowe wymuszeń wykazywały podobne cechy, jak wymuszenia poziome, tylko były z reguły mniejsze (por. np. [1, 2]). Konieczność osobnego rozwa-

żania składowych poziomych i pionowych wynika m. in. z faktu, że obiekty budowlane wykazują znacząco różne właściwości sprężyste i bezwładnościowe w przypadku drgań pionowych i poziomych, będąc z reguły znacznie bardziej odporne na wymuszenia pionowe niż poziome.

Kolejnym ważnym parametrem, który można powiązać ze skalami opisowymi, jest maksymalna prędkość powierzchni gruntu. Ważnym stosowaniem przyspieszeń w inżynierii sejsmicznej jest możliwość bezpośredniego powiązania przyspieszeń z obciążeniem sejsmicznym budowli przy zastosowaniu sił bezwładności. Prędkości ruchu gruntu stanowią jednak bezpośrednią miarę energii przekazywanej do budowli przez ruch podłoża. W pracy [3] podano następującą zależność między intensywnością MM a maksymalną prędkością:

$$\log_{10} v = 0,30 I_{MM} - 1,15, \quad v = [\text{cm/s}], \quad (4)$$

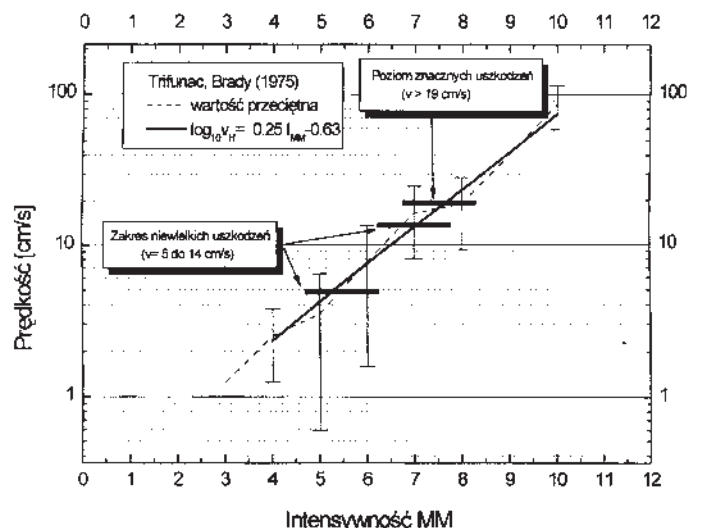
którą polecono stosować w przypadku intensywności do wartości X uznając, że można tą drogą szacować intensywność w dowolnym kierunku (x, y lub z). W pracy z 1975 roku [1] ustalono następującą zależność na poziomie prędkości

$$\log_{10} v_H = 0,25 I_{MM} - 0,63, \quad v = [\text{cm/s}], \quad IV \leq I_{MM} \leq X. \quad (5)$$

Odpowiednia zależność podana w [1] w odniesieniu do przemieszczeń ma postać

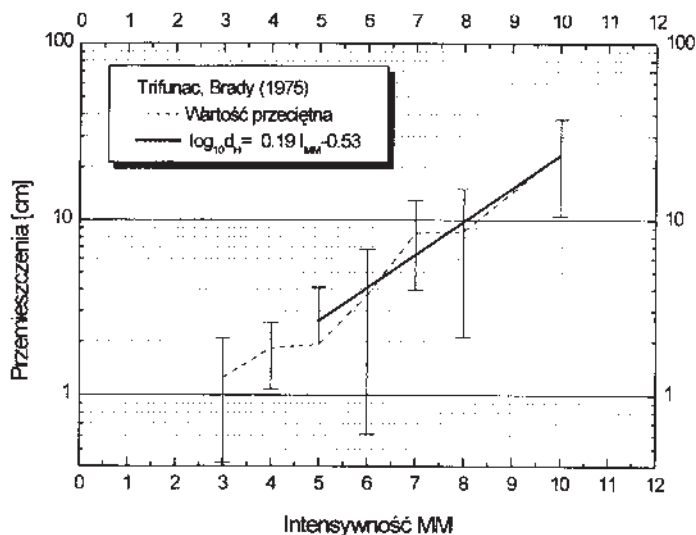
$$\log_{10} d_H = 0,19 I_{MM} - 0,53, \quad d = [\text{cm}], \quad V \leq I_{MM} \leq X. \quad (6)$$

Zależności te wykazują podobny rozrzut wyników jak przyspieszenia. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono wykresy poziomych prędkości (wzór 5) oraz przemieszczeń (wzór 6) w funkcji intensywności MM. Jak wykazały badania powierzchniowych efektów wybuchów podziemnych, wykonane przez *Duval* i *Fogelsona*²⁾, uszkodzenia obiektów budowlanych w sposób najbardziej bezpośredni zależą od prędkości drgań gruntu. Dlatego na wykresie z rys. 4 przedstawiono także zakresy tych prędkości wyznaczone przez *Duval* i *Fogelsona*. W badaniach tych uznano maksymalną prędkość podłoża $v < 5$ cm/s jako zakres nie powodujący uszkodzeń budowli, zakres $5 < v < 14$ cm/s jako zakres drobnych uszkodzeń oraz



Rys. 4. Zależność między maksymalną, poziomą prędkością ruchu gruntu a intensywnością wstrząsów w skali MM [1] oraz *Duval*, *Fogelson* 1962

²⁾ *Duval* W. I., *Fogelson* D. E.: Review of criteria for estimating damage to residences from blasting vibrations. US Dept. of the Interior, Bureau of Mines. Report of Investigations, 1962.



Rys. 5. Zależność między maksymalnym, poziomym przemieszczeniem ruchu gruntu a intensywnością wstrząsów w skali MM [1]

$v > 19$ cm/s jako zakres poważnych uszkodzeń. Na rysunku 4 można zauważyć, że przeciętne wartości maksymalnych prędkości w przypadku intensywności V–VI, VII–VIII i VIII–IX odpowiadają podanym trzem zakresom *Duvalla* i *Fogelzona*.

Wady, zalety i możliwości stosowania intensywności opisowych trzęsień ziemi do oceny intensywności wstrząsów górniczych

Próbując stosować opisowe skale intensywności trzęsień ziemi do wstrząsów górniczych należy zwrócić uwagę przede wszystkim na charakterystyczne różnice między tymi zjawiskami. Pierwszym parametrem wstrząsów górniczych, który wyraźnie odróżnia te wstrząsy od trzęsień ziemi, jest czas ich trwania. Parametr ten ma znaczny wpływ na destruktywne efekty wstrząsów sejsmicznych (por. np. [7]). Najczęściej odnotowywany bardzo krótki czas trwania wstrząsów górniczych (często nie przekraczający 1+2 s) powoduje, że takie efekty naturalnych wstrząsów sejsmicznych, jak podawane w skalach opisowych rozlewanie wody z dużych zbiorników wodnych i basenów czy dzwonienie dzwonów kościelnych, w ogóle nie występują. Wizualnie nie obserwuje się również fal na powierzchni gruntu. Trzeba zauważyć, że intensywne wstrząsy górnicze występują na ogół w obszarze od kilku do kilkunastu kilometrów, a nie kilkuset kilometrów, jak w przypadku trzęsień ziemi. Stąd też znaczne wahania intensywności wstrząsów górniczych na odległościach kilkuset metrów, niezależnie od różnic w lokalnej budowie geologicznej podłoża obiektów budowlanych.

Główną zaletą opisowych skal sejsmicznych jest prostota i stosunkowo szybka interpretacja. Problemy pojawiają się jednak, gdy chcemy zobiektywizować przypisania do tych skal i zamiast drobiazgowych, subiektywnych analiz reakcji ludzi, uszkodzeń budowli itp. próbujemy powiązać kolejne stopnie skali z mierzalnymi parametrami, np. maksymalnymi przyspieszeniami. Jak widać z rys. 2 i 3, takie przypisania charakteryzują się dużym rozrzutem. Wynika to m. in. z faktu, że dwa wstrząsy sejsmiczne o tych samych maksymalnych przyspieszeniach mogą znacząco różnić się czasem trwania i strukturą widmową, a co za tym idzie zupełnie inaczej działać na budowlę czy ludzi. Podejmuje się zatem próby powiązania maksymalnych przyspieszeń ruchu gruntu otrzymanych po odfiltrowaniu części składowych widmowych (np. powyżej 10 Hz) z kolejnymi stopniami skali MSK-64. Takie podejście stosuje się np. w odniesieniu do wstrząsów górniczych. Jego wyniki podlegają jednak takim samym wadom, jak wskazane poprzednio. Je-

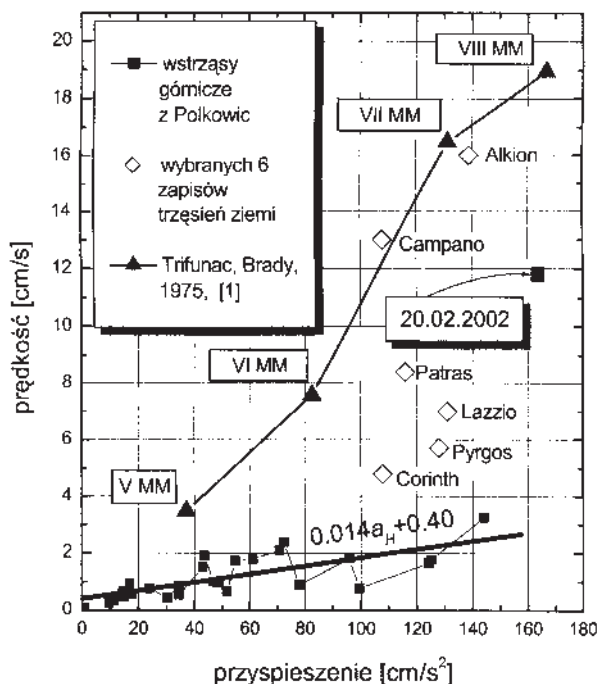
śli nawet dość starannie (na dużym zbiorze zapisów) ustalić taką zależność w odniesieniu do jednego obszaru, w którym trzęsienia ziemi mają swoje specyficzne cechy, to zależności takie nie muszą sprawdzić się w innym rejonie. Co więcej, zależności te ustalone w odniesieniu do trzęsień ziemi, z dużą dozą prawdopodobieństwa nie sprawdzą się w przypadku wstrząsów górniczych. Tak jak trzęsienia ziemi wykazują pewne cechy charakterystyczne na obszarze, na którym występują (np. kalifornijskie czy regionalne w Grecji lub Turcji), tak wstrząsy górnicze będą wykazywać takie różnice, tym bardziej że na różnice regionalne i geologiczne nałożą się tu charakterystyczne cechy wynikające ze sposobu eksploatacji złoża w kopalni i jej głębokości.

W okresie od marca do lipca 2001 r. zespół badawczy z Politechniki Opolskiej analizował występujące w Polkowicach wstrząsy górnicze i ich wpływ na budynki³⁾. Jednym z etapów tych badań była szczegółowa analiza powierzchniowych zapisów tych wstrząsów i porównanie ich z zapisami słabych trzęsień ziemi. Szczegółowe wyniki tych badań są przedstawione w pierwszym rozdziale raportu³⁾. Należy odnotować, że oprócz charakterystycznej cechy wstrząsów górniczych, jaką jest bardzo krótki czas trwania (1 ÷ 2 s) zauważono, często występujące, znaczne przesunięcia ich widma w stronę wyższych częstotliwości w porównaniu z naturalnymi wstrząsami sejsmicznymi. Taka struktura widmowa skutkuje dużym stosunkiem maksymalnych przyspieszeń do maksymalnych prędkości PGA/PGV, sięgającym nawet 40÷80. Wielkość ta w typowych kalifornijskich trzęsieniach ziemi wynosi 10 i zwiększa się do 20–30 w przypadku zapisów w niewielkiej odległości od epicentrum (tzw. zapisy „near field”), a maleje nawet do 5 w bardzo silnych trzęsieniach ziemi rejestrowanych w dużej odległości od epicentrum (tzw. zapisy „far field”). Takie dwa rodzaje przebiegów nazywa się w inżynierii sejsmicznej zapisami zdominowanymi przez przyspieszenia i zdominowanymi przez prędkości.

Inną cechą odróżniającą zapisy bliskich trzęsień ziemi od odległych jest stosunkowo duża wielkość składowej pionowej w porównaniu z poziomą w bliskich zapisach. W nowoczesnych normach sejsmicznych wpływy tych dwóch rodzajów wymuszeń analizuje się osobno, wykorzystując różne spektra odpowiedzi. Jak można zatem oczekiwać, wstrząsy górnicze mają pewne cechy słabych trzęsień ziemi mierzonych przy bardzo bliskich odległościach epicentralnych. Na rysunku 5 przedstawiono zależność między maksymalnymi poziomymi przyspieszeniami ruchu gruntu PGA a maksymalnymi prędkościami PGV ustalone w przypadku sześciu typowych słabych trzęsień ziemi (wybranych tak, aby ich $PGA = 1 \div 1,5$ m/s²), a także uśrednione wartości tych wielkości ustalone w [1] w odniesieniu do intensywności V–VIII w skali MM oraz wielkości te we wstrząsach górniczych w Polkowicach, zarejestrowanych od stycznia 2000 do maja 2001 r. Można zauważyć, że choć maksymalne przyspieszenia mają we wstrząsach w Polkowicach dość dużą wartość, to jednak prędkości są już znacznie mniejsze, najczęściej poniżej 5 cm/s. Należy jednak zastrzec, że kilku silnych wstrząsów w Polkowicach nie zarejestrowano prawidłowo, gdyż większość przyrządów używanych do tego celu ma maksymalny zakres pomiarowy 1 m/s².

20 lutego 2002 r. wystąpił w Polkowicach szczególnie silny wstrząs. Udało się zarejestrować jeden silny zapis poziomy z fundamentu wysokiego budynku: $PGA = 163$ cm/s², $PGV = 12,8$ cm/s i $PGD = 2,5$ cm. Czas trwania tego wstrząsu wyniósł ponad 5 s, a współczynnik $PGA/PGV = 14$. Już wstępna analiza tego wstrząsu⁴⁾ wskazuje, że był to jeden z najsilniej-

³⁾ Chmielewski T., Zembaty Z., Kowalski M., Górski P.: Studium porównawcze intensywności trzęsień ziemi i wstrząsów górniczych LGOM wraz z analizą i oceną ich szkodliwości na zabudowę. Raport z pracy naukowo-badawczej dla ZG Rudna w Polkowicach, Politechnika Opolska, lipiec 2001.



Rys. 6. Zależność między maksymalnymi poziomymi przyspieszeniami a maksymalnymi poziomymi prędkościami w przypadku wybranych zapisów trzęsień ziemi i wstrząsów górniczych, a także uśrednione wartości maksymalnych przyspieszeń i prędkości odpowiadające intensywnościom MM V-VII [1]

szych, zarejestrowanych w Polsce wstrząsów górniczych. Jego maksymalną intensywność w skalach MM i EMS-98 oszacowano na VI+ (ponad sześć) do VII, przy czym do tego celu wykorzystano opisy skutków tego wstrząsu na powierzchni gruntu i porównawczo maksymalne prędkości. Jak widać z wykresu na rys. 5 wstrząs ten odbiegał od dotychczasowych wstrząsów górniczych w Polkowicach. Mimo stosunkowo dużej intensywności wstrząs spowodował pojawienie się jedynie pewnej liczby drobnych uszkodzeń o charakterze niekonstrukcyjnym zaobserwowanych na niektórych budynkach. Wstrząs ten wywołał jednak zaniepokojenie mieszkańców i spowodował w kilku przypadkach przewrócenie mebli na wyższych kondygnacjach niektórych budynków.

Analiza zapisów wstrząsów górniczych w Polkowicach wykazała, że stosowanie do oceny intensywności opisowych MSK-64 przy wykorzystaniu do tego celu maksymalnych przyspieszeń prowadzi do dużych błędów. Dzieje się tak ponieważ na bardzo krótkich, często kilkusetmetrowych odległościach epicentralnych przyspieszenia często utrzymują dużą wartość przy stosunkowo niedużych prędkościach. Jeśli już w ogóle celowe byłoby stosowanie skal opisowych opracowanych w odniesieniu do trzęsień ziemi, to należałoby zastosować wyłącznie opis skutków wstrząsu, zgodnie z definicją skali. Gdyby chcieć do tego celu wykorzystać parametry liczbowe, to zdecydowanie lepsze rezultaty da zastosowanie maksymalnych prędkości poziomego ruchu gruntu, tak jak to już uczyniono dawniej w odniesieniu do wpływu drgań podłoża spowo-

dowanych wybuchami na budowie (por. np. cytowane wcześniej badania *Duvalla i Fogelzona* z 1962 roku).

Uwagi końcowe i wnioski

1. Opisowe intensywności trzęsień ziemi, mimo odległej już historii ich powstania i nieprecyzyjnego charakteru, są ciągle stosowane w inżynierii sejsmicznej. W pewnym sensie można je porównać do skali *Beauforta*, stosowanej przez morskie służby meteorologiczne, pochodzącej z XIX wieku. W przeciwieństwie jednak do tej skali, której kolejne stopnie są dobrze skorelowane z prędkością wiatru na morzu, odpowiednie stopnie skal opisowych MM, MSK czy EMS tylko w ograniczonym stopniu są powiązane z podstawowym parametrem sejsmicznych norm budowlanych – przyspieszeniem ruchu gruntu.

2. Stosowanie tych skal do opisu wstrząsów górniczych jest możliwe przy pewnych ograniczeniach, a w szczególności przy zachowaniu opisowego charakteru tych intensywności. Wykorzystywanie do tego celu znanych z inżynierii sejsmicznej zależności między kolejnymi stopniami intensywności a maksymalnymi przyspieszeniami prowadzi do grubych błędów spowodowanych dużymi różnicami w strukturze widmowej i czasie trwania wstrząsów górniczych i trzęsień ziemi.

3. Do oceny wpływu wstrząsów górniczych na budowie celowe byłoby opracowanie osobnych skal, i takie próby były już czynione [8]. Parametrem ruchu gruntu, który najlepiej można powiązać z odnotowanymi uszkodzeniami budowli poddanych tak wymuszeniom sejsmicznym, jak i parasejsmicznym jest maksymalna, pozioma prędkość gruntu. Potwierdzają to zarówno dawniejsze badania wpływu wybuchów na budowie (*Duvall i Fogelson* 1962), jak i nowsze doświadczenia w górnictwie odkrywkowym w USA⁵⁾.

PIŚMIENNICTWO

- [1] *Trifunac M. D., Brady A. G.*: On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded strong ground motion. „Bulletin of the Seismological Society of America”, vol. 65, no. 1/1975.
- [2] *Murphy J. R., O'Brien L. J.*: The correlation of peak ground acceleration amplitude with seismic intensity and other physical parameters. „Bulletin of the Seismological Society of America”, vol. 67, no. 3/1977.
- [3] *Newmark N., Rosenblueth E.*: Fundamentals of Earthquake Engineering. Englewood Cliffs, N. J., Prentice-Hall, 1971.
- [4] *Chmielewski T., Zembaty Z.*: Podstawy dynamiki budowli. Arkady, Warszawa 1998.
- [5] *Rutlage J. B.*: Reevaluation of Modified Mercalli Intensity Scale for earthquakes using distance as determinant. „Bulletin of the Seismological Society of America”, vol. 69, no. 3/1979.
- [6] *Ambraseys N.*: The correlation of intensity with ground motions; in: *Advancements in Engineering Seismology in Europe, Trieste 1974.*
- [7] *Zembaty Z.*: A note on non-stationary stochastic response and strong motion duration. „Earthquake Engineering & Structural Dynamics”, vol. 16, 1988.
- [8] *Muszyński L.*: Klasyfikacja dynamicznej odporności budynków. „Przełom Górniczy”, nr 1/1993.
- [9] *Ciesielski R., Kowalski W., Maciąg E., Tatara T.*: Badania dynamiczne ścianowych budynków prefabrykowanych podlegających wpływom odstrzałów w kamieniołomie. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 9/1995.
- [10] *Tatara T.*: Przybliżona ocena wpływu drgań od wstrząsów górniczych na budynki. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 1/2001.
- [11] Praca zbiorowa pod kierunkiem prof. *Jerzego Kwiatka*: Ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych. Wyd. Głównego Instytutu Górnictwa, Katowice 1998.

⁴⁾ *Zembaty Z.*: Wstrząs górniczy z 20 lutego 2002 w Polkowicach. Ocena intensywności zjawiska na powierzchni gruntu, ekspertyza dla ZG Rudna w Polkowicach, Politechnika Opolska, marzec 2002.

⁵⁾ *Siskind D. E., Stagg M. S., Kopp J. W., Dowding C. H.*: Structure response and damage produced by ground vibrations from surface mine blasting. Report of Investigation RI 8507, US Bureau of Mines, 1980.