GRZEGORZ MUTKE

# ODDZIAŁYWANIE GÓRNICZYCH WSTRZĄSÓW SEJSMICZNYCH NA POWIERZCHNIĘ





GŁÓWNY INSTYTUT GÓRNICTWA KATOWICE 2019 Grzegorz Mutke

# ODDZIAŁYWANIE GÓRNICZYCH WSTRZĄSÓW SEJSMICZNYCH NA POWIERZCHNIĘ



GŁÓWNY INSTYTUT GÓRNICTWA Katowice 2019 **Rada Programowa ds. Wydawnictw:** prof. dr hab. inż. Antoni Tajduś (przewodniczący), prof. Roman Ditchkovsky, prof. Dou Lin Ming, prof. dr hab. inż. Józef Dubiński, czł. koresp. PAN, prof. Juraj Durove, prof. dr hab. inż. Czesława Rosik-Dulewska, czł. koresp. PAN, doc. ing. Richard Snuparek, prof. Tomasz S. Wiltowski, prof. dr hab. inż. Teodor Winkler, prof. Valery N. Zakharov

Komitet Kwalifikacyjno-Opiniodawczy: prof. dr hab. Adam Smoliński (przewodniczący), dr hab. inż. Małgorzata Wysocka, prof. GIG (zastępca przewodniczącego), dr hab. inż. Stanisław Chałupnik, prof. GIG, dr hab. inż. Natalia Howaniec, prof. GIG, prof. dr hab. inż. Józef Kabiesz, dr hab. inż. Grzegorz Mutke, prof. GIG, prof. dr hab. inż. Krzysztof Stańczyk, prof. dr hab. inż. Jan Wachowicz

> Recenzenci prof. dr hab. inż. Józef Dubiński, czł. koresp. PAN prof. dr hab. inż. Wacław Dziurzyński

> > Redakcja wydawnicza Małgorzata Kuśmirek-Zegadło

> > > Korekta Barbara Dusik

Skład, łamanie Krzysztof Gralikowski

> Projekt okładki Kacper Mutke

#### ISBN 978-83-65503-21-3

Printed in Poland

All rights reserved Copyright by Główny Instytut Górnictwa

Sprzedaż wydawnictw Głównego Instytutu Górnictwa prowadzi Zespół Wydawnictw i Usług Poligraficznych **wydawnictwa.gig.eu** tel. 32 259-24-03, 32 259-24-04, e-mail: mkusmirek@gig.eu

Katowice, GIG 2019. Ark. wyd. 11,3. Format B5 Druk i oprawa: Zakład Poligraficzny "Węglogryf", Katowice

# Spis treści

1.	Wprowad	lzenie	5						
2.	Fale seismiczne								
	2.1. Typy fal seismicznych								
	2.1.1.	Fale przestrzenne	9						
	2.1.2.	Fale powierzchniowe	11						
	2.2. Paran	netry drgań harmonicznych	13						
	2.3. Parametry wyznaczane z reiestracji seismometrycznych								
	2.3.1. Szczytowa wartość przemieszczenia, predkości i przyspieszenia								
		pionowych drgań gruntu oraz przemieszczenia, prędkości							
		i przyspieszenia poziomych drgań gruntu w określonym kierunku	16						
	2.3.2.	Maksymalna wartość prędkości poziomych drgań gruntu PGV <sub>Hmax</sub>	19						
	2.3.3. Maksymalne przyspieszenie poziomych drgań gruntu w paśmie								
		do 10 Hz PGA <sub>H10max</sub>	19						
	2.3.4.	Czas trwania składowej poziomej prędkości drgań $t_{Hv}$	20						
	2.3.5.	Czas trwania składowej poziomej przyspieszenia drgań $t_{Ha}$	20						
	2.3.6.	Częstotliwość drgań	21						
	2.3.7.	Spektrum odpowiedzi							
	2.3.8.	Iloraz wartości szczytowych drgan <i>PGA/PGV</i>							
	2.3.9.	Intensywnosc Ariasa							
	2.3.10	Skumulowana wartość absolutna prędkości CAV	20						
	2.3.11	Parametry drgań rotacyjnych							
_	2.3.12								
3.	Czynniki	warunkujące intensywność drgań powierzchni	30						
	3.1. Skale	intensywności sejsmicznej	30						
	3.2. Czynn	iki wpływające na intensywność sejsmiczną	31						
	3.2.1.	Energia sejsmiczna	32						
	3.2.2.	Tłumienie drgań ze wzrostem odległości							
	3.2.3.	Amplifikacja drgań	56						
	3.2.4.	Kierunkowość drgań	80						
4.	Wybór pa	rametrów pomiarowych do oceny intensywności drgań							
	od wstrza	sów indukowanych eksploatacja górnicza	84						
	4.1. Spekt	ra odpowiedzi a obserwowane skutki drgań w zabudowie	86						
	4.1.1.	Ogólna charakterystyka makroseismiczna wstrzasu w dniu							
	20.02.2002 r. w Polkowicach 4.1.2. Spektrum odpowiedzi i skutki obserwowane w budynkach								
	z wielkiej płyty								
	4.1.3. Spektrum odpowiedzi i skutki obserwowane w wysokich								
	dwunastopiętrowych budynkach z wielkiej płyty (podatnych)								
	4.2. Czas trwania drgań i jego wpływ na reakcję obiektu budowlanego								

5.	Górnicze	skale intensywności sejsmicznej	99						
	5.1. Górnicze skale intensywności sejsmicznej dla obszaru LGOM								
	5.1.1. Górnicza Skala Intensywności Sejsmicznej GSI-2004/11								
	5.1.2. Górnicza Skala Intensywności Sejsmicznej GSI-2004/18								
	5.1.3. Weryfikacja Górniczej Skali Intensywności Sejsmicznej GSI-200								
	i GSI-2004/11								
	5.2. Górnicze skale intensywności sejsmicznej dla wstrząsów								
	indukowanych eksploatacją pokładów węgla w GZW i LZW								
	5.2.1. Górnicza Skala Intensywności Sejsmicznej GSIS-2017								
	5.2.2.	Wpływ rodzaju zabudowy na odporność dynamiczną	127						
	5.2.3.	Weryfikacja parametrów drgań od silnych wstrząsów górniczych							
		ze stopniami intensywności w skali GSIS-2017	140						
6.	Monitoro	wanie wstrząsów i mapy prognozowanych drgań	161						
	6.1. Sejsm	iczność indukowana eksploatacją złóż w polskich zagłębiach							
	górni	czych							
	6.2. Aparatura pomiarowa								
	6.3. Instalowanie odbiorników drgań								
	6.4. Interpretacia zapisów drgań zarejestrowanych na powierzchni								
	6.5. Archiwizacia wyników obserwacji sejsmometrycznych								
	6.6. Prowadzenie obserwacji skutków wstrzasów w objektach								
	hudowlanych i ich dokumentowanie								
	67 Przedstawianie wyników prognozy oddziaływania seismicznego								
	na no	wierzchnie	172						
	68 Kierunki rozwoju oceny oddziaływania wstrzasów górniczych								
	na nowierzchnie								
Lit	teratura		178						

# 1. Wprowadzenie

Eksploatacja górnicza powoduje rozwój procesów deformacji i spękania górotworu, a ich przejawem mogą być wstrząsy sejsmiczne. W kilku rejonach Polski sejsmiczność indukowana działalnością górniczą ma swoje konsekwencje nie tylko w postaci szkodliwego oddziaływania drgań na stateczność podziemnych wyrobisk górniczych i bezpieczeństwo pracujących tam ludzi (Mutke, 2008, 2011), oddziałuje również na powierzchnię (obiekty budowlane i infrastrukturę techniczną) i na mieszkańców tych rejonów (Mutke, 1991; Dubiński i Mutke, 2007; Dubiński i in., 2009b).

W monografii przedstawiono specjalistyczną skalę wykorzystywaną do oceny oddziaływania górniczych wstrząsów sejsmicznych na powierzchnię i jej weryfikację empiryczną. Zawarto w niej także podstawowe informacje o monitorowaniu drgań oraz charakterystykę ruchu falowego i parametrów drgań wywołanych zjawiskami sejsmicznymi. Omówiono również zagadnienia dotyczące czynników wpływających na charakterystykę parametrów i intensywność drgań powierzchni występujących w wyniku zjawisk sejsmicznych indukowanych eksploatacją górniczą. Najważniejsze z tych czynników, to: siła wstrząsu wyrażana energia sejsmiczna lub magnituda, tłumienie drgań ze wzrostem odległości, amplifikacja drgań, czyli ich wzmacnianie przez nadkład warstw przypowierzchniowych oraz kierunkowość drgań wynikająca z mechanizmu ogniska wstrząsu sejsmicznego. Istotnym rozdziałem monografii jest rozdział poświęcony wpływowi czasu trwania drgań na reakcję obiektu budowlanego na wymuszenia dynamiczne. Jest to bowiem podstawowy parametr, oprócz częstotliwości, odróżniający płytkie wstrząsy indukowane eksploatacją górniczą od trzęsień ziemi. Przedstawiono ponadto podstawowe modele statystycznych relacji tłumienia drgań stosowane w polskich zagłębiach górniczych. Relacje tłumienia odgrywają ważną rolę w wyznaczaniu pomiarowego stopnia intensywności sejsmicznej.

Wstrząsy górnicze zasadniczo różnią się od trzęsień ziemi – są zjawiskami słabszymi (mniejsza energia sejsmiczna i magnituda) i charakteryzują się wyższą częstotliwością drgań, często powyżej drgań własnych budynków. Maksymalne amplitudy drgań występują w strefie epicentralnej i wywoływane są najczęściej falami bezpośrednimi, a czas trwania drgań jest znacznie krótszy, często sprowadzający się do pojedynczego piku (Mutke i Dubiński, 2016). Reakcja budynków na takie drgania jest inna niż reakcja na drgania wywołane trzęsieniami ziemi, nawet przy porównywalnej szczytowej amplitudzie przy-

spieszenia lub prędkości drgań. Z tych przyczyn zarówno prognoza wstrząsów, jak i narzędzia służące do oceny skutków drgań na powierzchni (pomiarowo--opisowe skale intensywności drgań), będą zdecydowanie różne od opracowanych dla trzesień ziemi. Już w roku 1983 Dubiński i Gerlach (1983) podjęli próbe przystosowania skali MSK-64 do oceny oddziaływania wstrzasów górniczych na środowisko. Skala MSK jest skalą do oceny intensywności sejsmicznej trzęsień ziemi, a wersja z roku 1964 została zaprezentowana i zarekomendowana do stosowania przez Europejską Komisję Sejsmologiczną. Skala MSK-64 przypisuje opisowym stopniom intensywności skutków trzesienia ziemi, parametry drgań gruntu. Jednak w miarę gromadzenia coraz większej liczby obserwacji sejsmometrycznych i makrosejsmicznych, materiał empiryczny nie weryfikował pozytywnie ocen szkodliwości dokonanych według tej skali (Speczik i in., 2003). W zwiazku z powyższym podjeto próbe opracowania skali intensywności sejsmicznej dla wstrzasów indukowanych działalnością górniczą. W pierwszym etapie badań skupiono sie na seismiczności indukowanej eksploatacja złóż miedzi w Legnicko-Głogowskim Okregu Miedziowym (LGOM). Badania prowadzono w ramach projektu celowego nr 6 T12 0063 2002C/05870 pn. System oceny oddziaływań sejsmicznych na powierzchnię wywołanych przez eksploatację złoża rud miedzi w zakładach górniczych LGOM (lata 2002–2005), koordynowanego przez zespół z Głównego Instytutu Górnictwa pod kierunkiem prof. Józefa Dubińskiego. Wynikiem prac badawczych było opracowanie dwuparametrycznej Górniczej Skali Intensywności GSI-2004 służącej do oceny szkodliwości drgań za pomocą pomiarowych stopni intensywności. Pomiarowe stopnie intensywności zostały określone dla trzech stopni makroskopowo obserwowanej szkodliwości drgań, tj. od nieszkodliwych dla zabudowy, przez szkodliwe dla elementów niekonstrukcyjnych i wykończeniowych, po szkodliwe dla konstrukcji obiektów. Kryterium kwalifikowania drgań do pomiarowego stopnia intensywności stanowiły parametry poziomych amplitud prędkości i czasu trwania drgań. Ponieważ zjawiska sejsmiczne indukowane eksploatacją rud miedzi mieściły sie w ograniczonym charakterystycznym paśmie czestotliwości, w kryteriach nie uwzględniono odrębnie parametru częstotliwości drgań. W drugim etapie badania dotyczyły górniczej skali intensywności dla obszaru Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW), a bardziej precyzyjnie, kopalń należących w tamtym czasie do Kompanii Węglowej SA. Prace badawcze zaowocowały opracowaniem dla górnictwa wegla kamiennego skali GSI<sub>GZWKW</sub>-2012. którą wykonano dla kopalń ówczesnej Kompanii Węglowej SA (Dubiński i in., 2009; Mutke i in., 2012; Barański i in., 2014) i skali Mining Seismic Instrumental

Intensity Scale (MSIIS-15) (Mutke i in., 2015b) opracowanej w ramach projektu europejskiego finansowanego przez Fundusz Badawczy Węgla i Stali (RFCS) o akronimie COMEX, w której wykorzystano dane nie tylko z kopalń polskich, ale również z kopalń niemieckich i czeskich (Sroka, 2006; Pohl i Sroka, 2006; Alber i Fritschen, 2011; Holecko i Mutke, 2012). Po wystąpieniu w GZW kilku bardzo silnych wstrząsów w latach 2014–2017 o energii sejsmicznej przekraczającej 10<sup>8</sup> J i o amplitudzie prędkości drgań *PGV* > 0,05 m/s i przyspieszenia *PGA* > 1,0 m/s<sup>2</sup>, opracowano wersję skali GSIS-2017. W nowej skali rozróżniono skutki wstrząsu w zależności od typu budynku i jego stanu technicznego. Z kolei w zależności od skutków wstrząsu przypisanych poszczególnym stopniom intensywności drgań w skali GSIS-2017, wyróżniono poziomy empirycznej odporności dynamicznej budynków. Skale GSI i GSIS posiadają dużą wartość utylitarną i zostały zalecone do stosowania przez Komisję ds. Ochrony Powierzchni przy Wyższym Urzędzie Górniczym.

W ostatnim rozdziale monografii przedstawiono zasady monitorowania wstrząsów i obliczania map prognozowanych drgań.

Książka przeznaczona jest nie tylko dla specjalistów z zakresu sejsmometrii górniczej i dynamiki obiektów budowlanych, ale również dla kopalnianych służb geofizycznych i osób zajmujących się szeroko rozumianą ochroną powierzchni na terenach górniczych.

#### 2. Fale sejsmiczne

Rozdział został poświęcony falom sejsmicznym, które składają się z fal sprężystych. W ciałach stałych występują dwa rodzaje fal sprężystych, tj. fale zagęszczeniowe (podłużne), w których cząsteczki drgają zgodnie z kierunkiem rozchodzenia się fal i fale poprzeczne, w których cząsteczki ciała drgają prostopadle do kierunku rozchodzenia się fal.

Równanie różniczkowe drgań sprężystych w ośrodku izotropowym, tj. dla stałych parametrów Lame'go, w notacji indeksowej przyjmuje postać (Achenbach, 1975; Udias i in., 2014)

$$(\lambda + \mu)\mathbf{u}_{k,ki} + \mu\mathbf{u}_{i,jj} + \mathbf{F}_i = \rho \ddot{\mathbf{u}}_i$$
(2.1)

gdzie:

- $\lambda$  i  $\mu$  stałe sprężystości Lame'go opisujące liniową relację naprężenieodkształcenie w ośrodku materialnym izotropowym ( $\mu$  zwany jest modułem ścinania i jest miarą odporności ośrodka materialnego na ścinanie),
- ρ gęstość ośrodka materialnego,
- $\mathbf{F}_i$  siła masowa na jednostkę objętości,
- u przemieszczenie cząstek ośrodka,
- **ü**<sub>*i*</sub> przyspieszenie cząstek ośrodka.

W notacji wektorowej równanie (2.1) przyjmuje postać (Udias i in., 2014)

$$(\lambda + \mu)\nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) + \mu\nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{F} = \rho \ddot{\mathbf{u}}$$
(2.2)

gdzie ∇ jest operatorem nabla.

Jeżeli z równania (2.1) usunie się siły masowe i zostanie ono podzielone przez  $\rho$  oraz zostaną podstawione wyrażenia na kwadrat prędkości fali *P*  $(C_P^2 = (\alpha + 2\mu)/\rho)$  i na kwadrat prędkości fali *S*  $(C_S^2 = \mu/\rho)$ , to otrzyma się podstawowe sejsmiczne równanie falowe dla ośrodka jednorodnego (Shearer, 2009)

$$C_P{}^2 \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) - C_s{}^2 \nabla \times (\nabla \times \mathbf{u}) = \ddot{\mathbf{u}}$$
(2.3)

gdzie:

C<sub>P</sub> – prędkość propagacji fali podłużnej,

C<sub>s</sub> – prędkość propagacji fali poprzecznej.

Równanie (2.3) pokazuje, że prędkość propagacji  $C_P$  występuje z dywergencją  $\nabla \cdot \mathbf{u}$ , co oznacza zmiany w objętości lub radialne przemieszczenie (fala *P*) oraz, że prędkość propagacji  $C_S$  jest związana z  $\nabla \times \mathbf{u}$ , to znaczy ze zmianami

rotacji lub poprzecznych przemieszczeń (fala *S*). Z tego wynika, że oprócz rejestracji drgań translacyjnych można oczekiwać również rejestracji drgań rotacyjnych.

#### 2.1. Typy fal sejsmicznych

Podstawowe typy fal sejsmicznych to fale sejsmiczne przestrzenne (objętościowe) i powierzchniowe. Klasyfikację fal przedstawia rysunek 2.1.



Rys. 2.1. Klasyfikacja fal sejsmicznych

#### 2.1.1. Fale przestrzenne

W sejsmiczności indukowanej eksploatacją górniczą ogniska wstrząsów są zlokalizowane relatywnie płytko (od 0,5 km do około 3 km), gdy odniesie się je do płytkich trzęsień ziemi (ogniska na głębokości powyżej 10 km). Jest to główny powód występowania największych amplitud drgań w strefie epicentralnej, a drgania pochodzą od fal przestrzennych podłużnych *P* i poprzecznych *S*. W takich przypadkach rejestruje się wyższe częstotliwości głównej fazy drgań dla tych fal, co wynika głównie z mniejszych rozmiarów źródła sejsmicznego. Wyższe częstotliwości, czyli krótsze fale, są silniej tłumione i w odległościach poza strefą epicentralną ich amplitudy maleją często kilkukrotnie.

#### Fale podłużne

Fala podłużna *P*, zwana też dylatacyjną, jest falą sprężystą rozchodzącą się w masywie skalnym (górotworze). Podczas rozprzestrzeniania się tych fal cząstki skał drgają w kierunku równoległym do kierunku rozchodzenia się fal, powodując ściskanie i rozciąganie skał, przez które przechodzą (następuje zmiana objętości bez zmiany kształtu). Fale podłużne mogą rozchodzić się również w płynach, w tym także w płynnym jądrze Ziemi. Fale *P* są najszybsze z fal sejsmicznych (stąd oznaczane symbolem *P* – undae primae, łac.). Prędkość fal *P* 

na ogół zwiększa się z głębokością od około 2 do 8 km/s w skorupie Ziemi aż do około 13 km/s na granicy z jądrem. W skorupie i górnym płaszczu Ziemi występują jednak warstwy z mniejszą prędkością fal. W ośrodkach skalnych polskich zagłębi górniczych (GZW, LGOM i LZW), w strefie między ogniskami wstrząsów a powierzchnią, prędkość propagacji fal podłużnych nie przekracza 5–6 km/s.

Prędkość propagacji fali P wyraża wzór

$$C_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \tag{2.4}$$

gdzie:

 $\lambda$ i $\mu$ – stałe sprężystości Lame'go,

 $\rho$  – gęstość ośrodka skalnego.

#### Fale poprzeczne (ścinające)

Fale poprzeczne *S*, zwane też ścinającymi, wywołują zmianę kształtu ośrodka skalnego bez zmiany objętości. Podczas przechodzenia tych fal cząstki skał drgają w kierunku prostopadłym do kierunku rozchodzenia się fal. Wyróżnia się komponentę poziomą *SH* i pionową *SV*, które w ośrodku jednorodnym izotropowym przemieszczają się z tą samą prędkością. Fale poprzeczne *SH* i *SV* są to dwie fale spolaryzowane prostopadle względem siebie. Fale poprzeczne są około 1,5–2,0 razy wolniejsze od fal podłużnych (stąd oznaczane symbolem *S – undae secondae*, łac.). Mogą przemieszczać się tylko w ciałach stałych, ponieważ moduł sztywności w cieczach i gazach  $\mu = 0$ . Ponieważ fale *S* nie rozchodzą się w cieczach, nie przenikają przez płynne zewnętrzne jądro Ziemi.

Prędkość propagacji fali S określa wzór

$$C_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$
(2.5)

Amplitudy fal przestrzennych zanikają z odległością według formuły 1/r, gdzie r jest odległością hipocentralną.

W ośrodku skalnym warstwowanym, na granicach poszczególnych warstw, fale *P* i *S* ulegają załamaniu lub odbiciu. Tworzą się nowe fale: fala typu *P* tworzy kolejne cztery fale *P* i *SV* (załamaną i odbitą) – rysunek 2.2, fala *SV* tworzy kolejne cztery fale *P* i *SV* (załamaną i odbitą), a fala *SH* tworzy kolejne dwie fale *SH* (załamaną i odbitą) – rysunek 2.3. W pewnej odległości od epicentrum górniczego wstrząsu sejsmicznego pojawiają się również fale refrakcyjne. W przypadku napotkania na swojej drodze przeszkody geometrycznej, np. krawędzi, tworzą się fale dyfrakcyjne (Shearer, 2009).



**Rys. 2.2.** Typy fal przestrzennych tworzących się na granicy warstw skalnych dla padającej fali podłużnej *P* 



**Rys. 2.3.** Typy fal przestrzennych tworzących się na granicy warstw skalnych dla padającej fali poprzecznej typu *SH* 

#### 2.1.2. Fale powierzchniowe

W dużych odległościach epicentralnych fale powierzchniowe są istotnym elementem sygnału sejsmicznego. Silne wstrząsy sejsmiczne indukowane eksploatacją górniczą, przy sprzyjającej budowie przypowierzchniowych warstw geologicznych, mogą osiągać wysokie amplitudy drgań szkodliwie oddziaływujące na zabudowę powierzchniową.

Fala powierzchniowa powstaje w sąsiedztwie granicy sejsmicznej, najczęściej w strefie przypowierzchniowej ośrodka geologicznego. Wyróżnia się dwie podstawowe fale powierzchniowe, tj. fale Rayleigha i fale Love'a.

Fala Rayleigha (*R*) to powierzchniowa fala poprzeczna o polaryzacji pionowej, powstała z interferencji padających fal podłużnych *P* i poprzecznych *SV*. Ruch falowy obejmuje tylko warstwę przypowierzchniową podłoża i na głębokości rzędu długości fali praktycznie zanika. Cząstki gruntu oscylują w płaszczyźnie pionowej wzdłuż kierunku propagacji fali, przy czym są dwie składowe

11

tych oscylacji: pionowe drgania w górę i w dół oraz poziome do przodu i do tyłu. Na granicy skała-powietrze początkowe pionowe ruchy odbywają się w górę, ale początkowe poziome drganie jest w kierunku przeciwnym do propagacji fali. Dlatego ruch cząstek gruntu przy powierzchni odbywa się po elipsie wstecznie, czyli w kierunku przeciwnym do kierunku ruchu fali sejsmicznej. Pionowe amplitudy przemieszczenia cząstek są około 1,5 raza większe niż poziome. Ze wzrostem głębokości następuje zmniejszenie amplitudy drgań pionowych. Amplitudy przemieszczenia drgań poziomych wynoszą zero na głębokości 0,1–0,2 długości fali, a poniżej tej głębokości zmieniają kierunek. Od tej głębokości poziome drgania cząstek są zgodne z kierunkiem propagacji fali. Prędkość fali Rayleigha wynosi od 0,9*V*<sub>s</sub> i zależy od współczynnika Poissona. W ośrodkach niejednorodnych fala Rayleigha wykazuje dyspersyjność (prędkość zależy od częstotliwości) i w związku z tym propaguje z różnymi prędkościami w warstwach ośrodka o różnych właściwościach.

Fala Love'a (*L*) to powierzchniowa fala poprzeczna o polaryzacji poziomej, wywołująca drgania poziome, prostopadłe do kierunku rozchodzenia się fal. Fale Love'a powstają na skutek interferencji fal *SH*. Ich propagacja możliwa jest w warstwie skalnej przypowierzchniowej, charakteryzującej się niską prędkością propagacji fal sejsmicznych. Są to fale podobne do fal poprzecznych *S*, lecz drgania cząstek nie występują w kierunku pionowym. Fala Love'a jest zazwyczaj nieznacznie wolniejsza od fali Rayleigha.

Fale powierzchniowe jako propagujące w przestrzeni dwuwymiarowej są mniej tłumione od fal rozchodzących się w przestrzeni trójwymiarowej i są transmitowane na dalsze odległości. Amplitudy fal powierzchniowych zanikają z odległością według formuły  $1/\sqrt{r}$ , gdzie r jest odległością hipocentralną. Reguła tłumienia fal powierzchniowych powoduje utrzymywanie się dużych amplitud, w porównaniu do fal przestrzennych, w dużych odległościach hipocentralnych.

Fale powierzchniowe nie powstają w epicentrum wstrząsu, w związku z czym nie są rejestrowane w strefie wokół epicentrum. Minimalna odległość od epicentrum, na jakiej pojawiają się fale Rayleigha wywołane przez fale podłużne  $r_P$  i poprzeczne  $r_s$ , wynosi (Okamoto, 1984):

$$r_P = \frac{v_R}{\sqrt{v_P^2 - v_R^2}}d\tag{2.6}$$

$$r_S = \frac{v_R}{\sqrt{v_S^2 - v_R^2}} d$$
(2.7)

gdzie:

- v<sub>R</sub> prędkość fali Rayleigha,
- v<sub>P</sub> prędkość fali podłużnej,
- vs prędkość fali poprzecznej,
- *d* głębokość hipocentrum.

Dla ośrodka skalnego o średniej wartości modułu Poissona v = 0,25, ze wzorów (2.6) i (2.7), otrzymuje się minimalną odległość od epicentrum wytworzenia się fal powierzchniowych  $r_P = 0,63d$  i  $r_S = 2,33d$ . Dla ogniska wstrząsu o głębokości 1000 m otrzymuje się wartość  $r_P = 630$  m i  $r_S = 2330$  m.

Kierunki drgań cząstek ośrodka skalnego dla poszczególnych typów fal przestrzennych i powierzchniowych przedstawiono na rysunku 2.4.



**Rys. 2.4.** Schemat propagacji fal sejsmicznych; strzałki pokazują kierunek drgań cząstek masywu skalnego, a fale są uporządkowane według prędkości ich propagacji; a – ruch cząstek w przekroju poprzecznym, b – ruch cząstek w rzucie poziomym (opracowano na podstawie Bath, 1973)

#### 2.2. Parametry drgań harmonicznych

Tradycyjnie ruch falowy jest przedstawiany w postaci płaskiej fali sinusoidalnej. Maksymalne wychylenie liczone od położenia zerowego nazywa się amplitudą fali *A*.

Podstawowe parametry drgań harmonicznych to: okres, częstotliwość, częstość kątowa, prędkość propagacji, długość fali i liczba falowa oraz amplituda. Na rysunku 2.5 przedstawiono falę harmoniczną, na której zaznaczono

okres drgań *T*, natomiast na rysunku 2.6 – falę harmoniczną z zaznaczoną długością fali *L*. Długość fali *L* przedstawia się jako odległość między najbliższymi położeniami o tej samej fazie ruchu.



**Rys. 2.5.** Okres fali *T*: *A* – amplituda drgań, *t* – czas



**Rys. 2.6.** Długość fali *L*: *A* – amplituda drgań, *X* – odległość

Podstawowe parametry fali harmonicznej opisującej ruch sinusoidalny zestawiono w tabeli 2.1.

Tabela 2.1. Podstawowe parametry	/ fali	harmonicznej
----------------------------------	--------	--------------

Parametr	Symbol	Jednostka	Wzór
Częstość kątowa	ω	<b>S</b> <sup>-1</sup>	$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} = ck$
Częstotliwość	f	<b>S</b> <sup>-1</sup>	$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{T} = \frac{c}{L}$
Okres	Т	S	$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{L}{c}$
Prędkość propagacji	С	m/s	$c = \frac{L}{T} = fL = \frac{\omega}{k}$
Długość fali	L	m	$L = \frac{c}{f} = cT = \frac{2\pi}{k}$
Liczba falowa	k	m-1	$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{L} = \frac{2\pi f}{c} = \frac{2\pi}{cT}$

Amplituda szczytowa fali może być wyrażona przemieszczeniem, prędkością lub przyspieszeniem ruchu gruntu z położenia równowagi.

Wychylenie cząstki gruntu z położenia równowagi i cały przebieg takiego ruchu harmonicznego w czasie przedstawia sinusoida wyrażona wzorem

$$y = A\sin(\omega t) \tag{2.8}$$

gdzie:

*A* – maksymalna amplituda,

 $\omega$  – prędkość kątowa.

Prędkość drgań ruchu falowego harmonicznego otrzymuje się po zróżniczkowaniu przemieszczenia

$$\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} = A\omega\cos(\omega t) = A\omega\sin\left[\omega\left(t + \frac{\pi}{2}\right)\right]$$
(2.9)

przy czym maksymalna amplituda prędkości drgań *PGV* występuje przy przejściu cząstki przez położenie równowagi

$$PGV = A\omega = 2\pi fA \tag{2.10}$$

gdzie f jest częstotliwością drgań.

Przyspieszenie drgań ruchu falowego harmonicznego otrzymuje się po zróżniczkowaniu prędkości

$$\frac{d^2 y}{t} = -A\omega^2 \sin(\omega t) \tag{2.11}$$

przy czym maksymalna amplituda przyspieszenia drgań *PGA* występuje przy maksymalnych wychyleniach cząstki, ale ze znakiem przeciwnym

$$PGA = A\omega^2 = 4\pi^2 a f^2 \tag{2.12}$$

Na podstawie wzoru (2.12) można stwierdzić, że przyspieszenie drgań jest proporcjonalne do kwadratu częstotliwości drgań. Oznacza to, że dla wstrząsów o wysokiej częstotliwości drgań, przyspieszenie *PGA* może być bardzo duże, mimo małej wartości amplitudy przemieszczenia *A*.

#### 2.3. Parametry wyznaczane z rejestracji sejsmometrycznych

Do podstawowych parametrów sejsmometrycznych służących charakterystyce intensywności oddziaływania drgań indukowanych eksploatacją górniczą na powierzchnię (na zabudowę, infrastrukturę i ludzi) służą następujące parametry:

• szczytowa wartość przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia pionowych drgań gruntu *PGDz*, *PGVz* i *PGAz*,

- szczytowa wartość przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia poziomych drgań gruntu w określonym kierunku PGD<sub>H</sub>, PGV<sub>H</sub> i PGA<sub>H</sub>,
- maksymalna wartość prędkości poziomych drgań gruntu PGV<sub>Hmax</sub> i maksymalna wartość przyspieszeń poziomych PGA<sub>H10</sub> wyznaczona jako wypadkowa poziomego maksimum długości wektora,
- czas trwania składowej poziomej prędkości drgań  $t_{Hv}$  i przyspieszenia drgań  $t_{Ha}$
- częstotliwość drgań,
- spektrum odpowiedzi,
- iloraz wartości szczytowych drgań PGA/PGV,
- intensywność Ariasa,
- skumulowana absolutna wartość prędkości CAV,
- skumulowana absolutna wartość przemieszczenia CAD,
- parametry charakteryzujące drgania rotacyjne.

## 2.3.1. Szczytowa wartość przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia pionowych drgań gruntu P oraz przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia poziomych drgań gruntu w określonym kierunku

Szczytowa wartość amplitudy przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia drgań to podstawowy parametr oceny zagrożenia sejsmicznego stosowany od początku w sejsmologii inżynierskiej. Jego rola w przeszłości była nieco przeceniana, bowiem bez uzupełniania o inne charakterystyki drgań, może on prowadzić do błędnej oceny zagrożenia sejsmicznego. Drgania w zakresie wyższych częstotliwości, poza zakresem drgań własnych budowli, nie stanowią dla nich zagrożenia, nawet przy bardzo wysokich wartościach amplitud drgań. Parametrem szczególnie czułym na zakres częstotliwości jest przyspieszenie. Z jednej strony warunki lokalne mogą powodować duże, ale wysokoczęstotliwościowe przyspieszenia drgań gruntu, które nie są charakterystyczne dla większego obszaru (problem relacji tłumienia został omówiony w dalszej części monografii). Z drugiej strony wysokoczęstotliwościowe przyspieszenia nie wywołuja znaczącej odpowiedzi budynków na drgania i nie są źródłem dużych niszczących sił dynamicznych. Z tej przyczyny dla sejsmiczności indukowanej eksploatacją górniczą, która wywołuje czasami drgania w zakresie częstotliwości wysokich, odfiltrowuje się drgania powyżej 10 Hz. W ten sposób pozostawia się jedynie jako sygnał użyteczny drgania niskoczęstotliwościowe w paśmie do 10 Hz.

Na rysunkach 2.7, 2.7a i 2.7b przedstawiono rejestrację przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia drgań dla silnego górniczego wstrząsu sejsmicznego w GZW w dniu 11.08.2018 r., godz. 11:53:04,06, o energii  $E = 9.10^8$  J (magnituda z momentu sejsmicznego  $M_W = 3,9$ ) w odległości epicentralnej  $r_e = 2900$  m. Wstrząs został zarejestrowany przez stację powierzchniową Mg w Bytomiu na trójskładowym akcelerometrze. Rejestracje pochodzą z archiwum sejsmologicznego Górnośląskiej Regionalnej Sieci Sejsmologicznej Głównego Instytutu Górnictwa (GRSS GIG). Z akcelerogramów lub sejsmogramów odczytuje się szczytowe wartości drgań na poszczególnych składowych.



**Rys. 2.7.** Rejestracja amplitud przemieszczenia drgań wstrząsu, który wystąpił na obszarze GZW w dniu 11.08.2018 r., godz. 11:53:04,06, o energii sejsmicznej  $E = 9 \cdot 10^8$  J, w odległości epicentralnej  $r_e = 2900$  m; szczytowa wartość przemieszczenia w kierunku pionowym wyniosła  $PGD_Z = 0,43$  mm, natomiast szczytowa wartość przemieszczenia w kierunku poziomym wyniosła  $PGD_{NS} = 0,67$  mm (rejestracja dokonana przez stację sejsmiczną Mg, znajdująca się w archiwum GRSS GIG)







**Rys. 2.7b.** Rejestracja amplitud przyspieszenia drgań wstrząsu, który wystąpił na obszarze GZW w dniu 11.08.2018 r., godz. 11:53:04,06, o energii sejsmicznej  $E = 9 \cdot 10^8$  J, w odległości epicentralnej  $r_e = 2900$  m; szczytowa wartość przyspieszenia w kierunku pionowym wyniosła  $PGA_Z = 199,5$  mm/s<sup>2</sup>, natomiast szczytowa wartość przyspieszenia w kierunku poziomym wyniosła  $PGA_{EW} = 390,8$  mm/s<sup>2</sup> (rejestracja dokonana przez stację sejsmiczną Mg, znajdująca się w archiwum GRSS GIG)

#### 2.3.2. Maksymalna wartość prędkości poziomych drgań gruntu PGV<sub>Hmax</sub>

Maksymalna wartość prędkości poziomych drgań gruntu  $PGV_{Hmax}$  (m/s), wyznaczana jako wypadkowa poziomego maksimum długości wektora, jest podstawowym parametrem stosowanym w wielu skalach intensywności sejsmicznej. Między innymi jest jednym z parametrów oceny szkodliwości drgań według górniczej skali intensywności sejsmicznej

$$PGV_{H\max} = \frac{\max}{t} \sqrt{V_x^2(t) + V_y^2(t)}$$
(2.13)

gdzie:

 $V_x(t)$  – sejsmogram składowej poziomej x prędkości drgań,

 $V_y(t)$  – sejsmogram składowej poziomej y prędkości drgań.

Odbiorniki drgań składowych poziomych x i y leżą w jednej płaszczyźnie i są wzajemnie prostopadłe. Powyższa procedura obliczeniowa pozwala na uniezależnienie się od kierunkowości instalacji odbiorników drgań. Wartość prędkości drgań poziomych  $PGV_{Hmax}$  może być obliczana z bezpośredniej rejestracji wyskalowanego sejsmogramu (zapisu prędkości drgań) lub po operacji całkowania akcelerogramu (zapisu przyspieszenia drgań), z zachowaniem procedury przygotowania sygnału do całkowania (skorygowanie trendu linii bazowej w zapisie – *baseline correction*).

Dla wstrząsu górniczego przedstawionego na rysunku 2.7a wartość parametru wynosi  $PGV_{Hmax}$  = 11,8 mm/s i jest wyższa od szczytowych drgań poziomych w kierunku *EW* wynoszących  $PGV_{EW}$  = 10,4 mm/s.

#### 2.3.3. Maksymalne przyspieszenie poziomych drgań gruntu w paśmie do 10 Hz PGA<sub>H10max</sub>

Maksymalne przyspieszenie poziomych drgań gruntu w paśmie do 10 Hz  $PGA_{H10max}$  [m/s<sup>2</sup>] wyznaczane jest jako wypadkowa poziomego maksimum długości wektora. Budynek reaguje głównie na drgania poziome, które wywołują w nim siły bezwładności. Odfiltrowanie drgań wysokoczęstotliwościowych powyżej 10 Hz ma na celu pozostawienie sygnału użytecznego, który będzie stosowany do obliczania sił bezwładności

$$PGA_{H10max} = \frac{\max}{t} \sqrt{a_x^2(t) + a_y^2(t)}$$
(2.14)

gdzie:

 $a_x(t)$  – akcelerogram składowej poziomej x przyspieszenia drgań,

 $a_y(t)$  – akcelerogram składowej poziomej y przyspieszenia drgań.

Dla wstrząsu przedstawionego na rysunku 2.7b wartość parametru przyspieszeń filtrowanych w paśmie do 10 Hz wynosi  $PGA_{H10max} = 0,270 \text{ mm/s}^2$  i jest niższa od szczytowych, niefiltrowanych drgań poziomych w kierunku *EW*, wynoszących *PGV<sub>EW</sub>* = 390,8 mm/s<sup>2</sup>. Fakt ten wynika z istotnego udziału w przyspieszeniu drgań składowych powyżej 10 Hz.

#### 2.3.4. Czas trwania składowej poziomej prędkości drgań t<sub>Hv</sub>

Czas trwania drgań  $t_{Hv}$  [s] jest wyznaczany z całki sumy kwadratów składowych poziomych prędkości drgań (Trifunac i Brady, 1975; Mutke, 1991; Zembaty, 2004). Czas trwania oznacza przedział czasu zawarty między momentami czasowymi  $t_1$  i  $t_2$  we wzorze na intensywność

$$t_{H\nu}(t_k) = \int_{t_1}^{t_2} (V_x^2(t) + V_Y^2(t)) dt$$

$$t_{H\nu} = t_2 - t_1$$
(2.15)

gdzie:

- t1 czas, po którym (2.15) osiąga 5% wartości tej całki, obliczonej dla całego zarejestrowanego zapisu drgań,
- t<sub>2</sub> czas, po którym (2.15) osiąga 95% wartości tej całki, obliczonej dla całego zarejestrowanego zapisu drgań,
- $t_k$  całkowity czas rejestracji wstrząsu na sejsmogramie.

Czas trwania drgań jest podstawowym parametrem stosowanym do oceny szkodliwości drgań według górniczej skali intensywności sejsmicznej. Ze względu na znaczne zróżnicowanie czasów trwania drgań w sejsmiczności indukowanej, od pojedynczych impulsów do drgań wieloimpulsowych, reakcja budynku jest różna na drgania o takich samych amplitudach prędkości. Zagadnienie to zostało szczegółowo omówione w kolejnym rozdziale. Dla wstrząsu przedstawionego na rysunku 2.7a wartość czasu trwania drgań obliczona według wzoru (2.15) wynosi  $t_{Hv}$  = 2,24 s.

#### 2.3.5. Czas trwania składowej poziomej przyspieszenia drgań t<sub>Ha</sub>

W przypadku parametru przyspieszenia drgań do obliczania czasu trwania  $t_{Ha}$  [s] stosuje się wzór analogiczny jak (2.15) z tym, że uwzględnia się amplitudy przyspieszenia drgań w zakresie do 10 Hz zamiast prędkości tych drgań

$$t_{Ha}(t_k) = \int_{t_1}^{t_2} (a_x^2(t) + a_y^2(t)) dt$$

$$t_{Ha} = t_2 - t_1$$
(2.16)

gdzie:

- $t_1$  czas, po którym (2.16) osiąga 5% wartości tej całki, obliczonej dla całego zarejestrowanego zapisu drgań,
- t<sub>2</sub> czas, po którym (2.16) osiąga 95% wartości tej całki, obliczonej dla całego zarejestrowanego zapisu drgań,
- $t_k$  całkowity czas rejestracji wstrząsu na akcelerogramie.

Dla wstrząsu przedstawionego na rysunku 2.7b czas trwania drgań obliczony według wzoru (2.16) wynosi  $t_{Ha}$  = 2,04 s.

#### 2.3.6. Częstotliwość drgań

Częstotliwość liczona jest najczęściej z wykorzystaniem metody spektrum Fouriera. Ciągła postać transformaty Fouriera jest wyrażona wzorem

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j2\pi f t} dt$$
 (2.17)

gdzie:

j – jednostka urojona ( $j^2 = -1$ );

*f* – częstotliwość, Hz;

t - czas, s.

Całka Fouriera przedstawia widmo amplitudowe funkcji s(t), czyli ilustruje zależność amplitud poszczególnych składowych sygnału określonego funkcją s(t) od częstotliwości.

Na rysunku 2.8 pokazano przykład analizy widmowej dla wstrząsu górniczego przedstawionego na rysunku 2.7b.

W widmie znajduje się zwykle wiele pików składowych harmonicznych drgań gruntu, Zembaty (2002) zaproponował więc wprowadzenie wielkości zwanej częstością centralną  $f_{centr}$ , zdefiniowaną z wykorzystaniem tzw. momentu spektralnego pierwszego rzędu z gęstości widmowej  $S(\omega)$ .

$$f_{\text{centr}} = \frac{1}{2\pi} \frac{\int_0^\infty \omega S(\omega) d\omega}{\int_0^\infty S(\omega) d\omega}$$
(2.18)

Najnowszą analizą czasowo-częstotliwościową drgań jest metoda *Matching Pursuit* (Mallat i Zhang, 1993). Wyniki analizy przedstawiane są jako rozkład energii uzyskany za pomocą dystrybucji Wignera, zwany również mapą Wignera. Metoda daje możliwość zlokalizowania w czasie charakterystycznych częstotliwości wpływających na budowę danego sygnału sejsmicznego (Pyra, 2017).



**Rys. 2.8.** Analiza częstotliwościowa z rejestracji przyspieszenia drgań, tzw. widmo mocy (ang. *power spectrum*) dla wstrząsu z rysunku 2.7b; na składowych poziomych analizowanego wstrząsu dominują drgania z zakresu od 4 do 6 Hz, natomiast na składowej pionowej drgania z zakresu od 8 do 9 Hz

#### 2.3.7. Spektrum odpowiedzi

Spektrum odpowiedzi to jeden z podstawowych parametrów wykorzystywany do projektowania budowli na terenach sejsmicznych (np. Eurokod 8, norma PN-85/B-02170-2016-12). Parametr ten jest też stosowany w skali GSI-2004 jako parametr pomocniczy do wyznaczania stopni intensywności drgań. Spektra są tutaj zdefiniowane przez maksymalną odpowiedź oscylatora o jednym stopniu swobody, poddanego w podstawie ruchowi drgającemu (przyspieszeniu).

Bezwzględne spektra odpowiedzi (przyspieszeniowe) wyznaczano dla modelu oscylatora z jednym stopniem swobody i przyjętym ułamkiem tłumienia równym 5%. Algorytm obliczeniowy przedstawianych spektrów odpowiedzi został przyjęty według rozwiązania Nigama i Jenningsa (1969). Do tego algorytmu w Głównym Instytucie Górnictwa powstał autorski program komputerowy stosowany w jednej z wersji oprogramowania SEJSGRAM wykorzystywanego do interpretacji drgań od wstrząsów zarejestrowanych z użyciem aparatury AMAX-GSI i AMAX-GSIS (Lurka i Logiewa, 2007). Podstawowe założenia algorytmu Nigama i Jenningsa przedstawione są w literaturze (Nigam i Jennings, 1969; Tatara, 2012). Spektrum odpowiedzi wyznaczone dla równania różniczkowego ruchu poziomych drgań oscylatora o jednym stopniu swobody można zapisać następująco

$$m\ddot{y}(t) + D\dot{y}(t) + ky(t) = -m\ddot{y}_{p}(t)$$
(2.19)

gdzie:

y(t) – przemieszczenie względne oscylatora między gruntem i masą,

- $\ddot{y}(t)$  przyspieszenie drgań podłoża,
- $\dot{y}(t)$  prędkość masy względem gruntu,
- *m* masa oscylatora,
- *D* ułamek tłumienia krytycznego oscylatora,
- *k* naturalny okres drgań własnych oscylatora.

Przemieszczenie względne oscylatora wyraża się całką Duhamela

$$y(t,\omega,D) = -\frac{1}{\omega'} \int_0^t \ddot{y}_p(\tau) e^{-D\omega(t-\tau)} \sin \omega'(t-\tau) d\tau$$
(2.20)

gdzie:

 $ω' = ω\sqrt{1-D^2}$  – częstość kołowa drgań własnych tłumionych oscylatora, przy czym ω – częstość kołowa drgań własnych nietłumionych oscylatora, ω = k/m,  $D = \frac{r}{2\sqrt{mk}} \approx \frac{\delta}{2\pi}$  – ułamek tłumienia krytycznego, gdzie δ to logarytmiczny dekrement tłumienia.

Wobec małego *D* można przyjąć  $\omega' = \omega$ . Przy tym założeniu do rozwiązania całki (2.20) stosuje się różne metody numeryczne. W ten sposób dla konkretnej wartości  $\omega$  (przy ustalonym *D*) oblicza się przemieszczenie względne oscylatora. Maksymalne względne przemieszczenie drgań masy oscylatora, w zależności od okresu drgań własnych i tłumienia, nazywa się względnym przemieszczeniowym spektrum odpowiedzi

$$S_d(\omega, D) = \max_t |q(t, \omega, D)|$$
(2.21)

Wyznaczone maksymalne względne prędkości drgań oscylatorów o tej samej wartości ułamka tłumienia krytycznego zostają przyporządkowane okresowi drgań własnych oscylatorów i powstaje względne prędkościowe spektrum odpowiedzi (2.22)

$$S_{vr}(\omega, D) = \max_{t} |\dot{q}(t, \omega, D)|$$
(2.22)

Bezwzględnym przyspieszeniowym spektrum odpowiedzi jest rozkład maksymalnych bezwzględnych przyspieszeń mas oscylatorów o tej samej wartości ułamka tłumienia krytycznego, w zależności od okresu drgań własnych oscylatorów w odpowiedzi na drgania podłoża

$$S_{ar}(\omega, D) = \max_{t} |\ddot{q}(t, \omega, D) + \ddot{u}(t)|$$
(2.23)

W praktyce wzory na względne prędkościowe i bezwzględne przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi nie są często używane, ponieważ szacowane są one na podstawie względnego przemieszczeniowego spektrum odpowiedzi. Otrzymane w ten sposób spektra odpowiedzi noszą nazwę pseudoprędkościowych i pseudoprzyspieszeniowych spektrów odpowiedzi i są powiązane między sobą

$$S_a(\omega, D) = \omega S_v(\omega, D) = \omega^2 S_d(\omega, D)$$
(2.24)

Sporządzone na podstawie znanego (zarejestrowanego) ruchu podłoża spektrum odpowiedzi, o znanym okresie *T* i tłumieniu *D*, pozwala na oszacowanie dla obiektu spodziewanej maksymalnej wartości odpowiedzi konstrukcji (w postaci przemieszczenia względnego, prędkości względnej lub bezwzględnego przyspieszenia). Tak jest prawie zawsze w przypadku trzęsień ziemi charakteryzujących się dużymi okresami drgań, najczęściej powyżej 0,5 s. W przypadku wstrząsów górniczych natomiast w obrazie falowym dominują drgania o okresach krótszych lub równych okresom drgań własnych budynków. Drgania o małych okresach drgań, poniżej 0,1 s, ulegają z reguły redukcji przy przejściu z gruntu na fundament. Ten fakt wpływa oczywiście na rzeczywistą odpowiedź budynku na drgania wysokoczęstotliwościowe, w obszarze odpowiedzi na drgania o znacznie wyższych częstotliwościach niż częstotliwość drgań własnych budynku.

Na rysunkach 2.9, 2.9a i 2.9b przedstawiono przykłady obliczeniowe spektrów odpowiedzi dla składowej poziomej *EW* wstrząsu przedstawionego na rysunku 2.7b.



**Rys. 2.9.** Względne przemieszczeniowe spektrum odpowiedzi dla wstrząsu na obszarze GZW o energii sejsmicznej  $E = 9.10^8$  J i dla składowej poziomej *EW* (patrz rys. 2.7b)



**Rys. 2.9a.** Pseudoprędkościowe spektrum odpowiedzi dla wstrząsu na obszarze GZW o energii sejsmicznej  $E = 9.10^8$  J i dla składowej poziomej EW (patrz rys. 2.7b)



**Rys. 2.9b.** Pseudoprzyspieszeniowe spektrum odpowiedzi dla wstrząsu na obszarze GZW o energii sejsmicznej  $E = 9.10^8$  J i dla składowej poziomej *EW* (patrz rys. 2.7b)

Spektrum odpowiedzi jest funkcją wyrażającą maksymalne, bezwzględne wartości odpowiedzi modeli oscylatorów o jednym stopniu swobody, na wymuszenia dynamiczne, w zależności od okresów drgań własnych tych oscylatorów, przy założonej wartości ułamka tłumienia krytycznego. Spektrum odpowiedzi stanowi podstawę do wyznaczania sił bezwładności, generowanych przez ruch podłoża (Chmielewski i Zembaty, 1998; Tatara, 2012).

#### 2.3.8. Iloraz wartości szczytowych drgań PGA/PGV

Parametr wartości szczytowych drgań *PGA/PGV* w prosty sposób pokazuje charakterystykę górniczych wstrząsów sejsmicznych pod względem częstotliwościowym. Przykładowo dla wstrząsów niskoczęstotliwościowych jak trzęsienia ziemi, iloraz *PGA/PGV* jest mały i wynosi z reguły do 10, natomiast dla wstrząsów górniczych o wyższych częstotliwościach drgań, iloraz ten przyjmuje wartości z zakresu 20–85 (Zembaty, 2002; Mutke i Chodacki, 2010; Mutke i Dubiński, 2016). Czym wyższa wartość parametru *PGA/PGV* tym większy udział składowych drgań o wyższych częstotliwościach.

Dla wstrząsu przedstawionego na rysunku 2.7b iloraz wartości szczytowych drgań *PGA/PGV* wynosi 22,8 i jest zdecydowanie wyższy niż dla trzęsień ziemi.

#### 2.3.9. Intensywność Ariasa

Intensywność Ariasa wyraża wzór (Arias, 1970)

$$I_a = \pi/(2g) \int_0^{t_d} [a(t)]^2 dt$$
 (2.25)

gdzie:

*I*<sup>*a*</sup> – intensywność Ariasa, m/s;

*a*(*t*) – przyspieszenie, m/s<sup>2</sup>;

g – przyspieszenie ziemskie, m/s<sup>2</sup>;

 $t_d$  – czas trwania drgań gruntu, s.

Intensywność Ariasa stosuje się między innymi jako parametr, którego wielkość określa kryterium wywołania osuwiska przez trzęsienie ziemi.

#### 2.3.10. Skumulowana wartość absolutna prędkości CAV

Skumulowana wartość absolutna prędkości *CAV* jest zdefiniowana jako wartość absolutna całki z czasowego przebiegu przyspieszenia drgań (Mendecki, 2013)

$$CAV = \int_0^{t_d} |a(t)| \mathrm{d}t \tag{2.26}$$

Na rysunku 2.10 przedstawiono przykład obliczeniowy skumulowanej wartości absolutnej prędkości *CAV* dla wstrząsu przedstawionego na rysunku 2.7b.



**Rys. 2.10.** Skumulowana wartość absolutna prędkości *CAV* dla wstrząsu przedstawionego na rysunku 2.7b

#### 2.3.11. Skumulowana wartość absolutna przemieszczenia CAD

Skumulowana wartość absolutna przemieszczenia *CAD* jest definiowana jako wartość absolutna całki z czasowego przebiegu prędkości drgań (Mendecki, 2013)

$$CAD = \int_0^{t_d} |v(t)| \mathrm{d}t \tag{2.27}$$

#### 2.3.12. Parametry drgań rotacyjnych

W równaniu (2.3) można zauważyć, że prędkość propagacji  $C_S$  jest związana z wyrażeniem  $\nabla \times \mathbf{u}$ , to znaczy ze zmianami rotacji i poprzecznych przemieszczeń (fala *S*). Wynika z tego, że oprócz rejestracji drgań translacyjnych, można oczekiwać również rejestracji drgań rotacyjnych na powierzchni ziemi.

W opisie matematycznym widoczna jest wyraźna korelacja między prędkością kątową drgań gruntu, a odpowiednim wektorem pochodnej po czasie przemieszczenia drgań gruntu (Igel, Käser i Stupazzini, 2015)

$$\boldsymbol{\omega} = (\boldsymbol{\omega}_{\mathbf{X}}, \boldsymbol{\omega}_{\mathbf{Y}}, \boldsymbol{\omega}_{\mathbf{Z}}) = \frac{1}{2} \nabla \times \dot{\mathbf{u}} = \frac{1}{2} \nabla \times \mathbf{v} =$$
  
=  $(\partial_{Y} \mathbf{v}_{\mathbf{Z}} - \partial_{Z} \mathbf{v}_{\mathbf{Y}}) \hat{\mathbf{x}} + (\partial_{X} \mathbf{v}_{\mathbf{Z}} - \partial_{Z} \mathbf{v}_{\mathbf{X}}) \hat{\mathbf{y}} + (\partial_{X} \mathbf{v}_{\mathbf{Y}} - \partial_{Y} \mathbf{v}_{\mathbf{X}}) \hat{\mathbf{z}}$  (2.28)

gdzie:

 $ω = (ω_x, ω_y, ω_z)$  – wektor prędkości kątowej,

- **u** pochodna po czasie z wektora przemieszczenia drgań,
- v wektor translacyjnej prędkości drgań,
- $\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{y}}, \hat{\mathbf{z}}$  wektor jednostkowy w kierunku osi *X*, *Y* i *Z*.

W ostatnich latach w sejsmologii globalnej trzęsień ziemi i w sejsmiczności indukowanej dynamicznie rozwija się monitoring drgań rotacyjnych z zastosowaniem mierników nowej generacji, tj. czujników rotacyjnych (Teisseyre, Takeo i Majewski, 2008). Obserwacje sejsmiczne fal prowadzone na stacjach powierzchniowych dowodzą występowania w polu falowym dodatkowych istotnych efektów drgań rotacyjnych (Nigbor, 1994; Igel i in., 2005; Lee, Igel i Trifunac, 2009; Kalab i Knejzlik, 2012; Zembaty i in., 2017a).

Podstawowymi parametrami opisującymi drgania rotacyjne dla celów sejsmologii inżynierskiej są (Lee i in., 2009):

prędkość kątowa drgań wokół osi pionowej Z (ang. torsion)

$$\omega_Z = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_X}{\partial Y} - \frac{\partial u_Y}{\partial X} \right) \tag{2.29}$$

• prędkość kątowa drgań wokół osi poziomej Y i X (ang. rocking)

$$\omega_Y = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_X}{\partial Z} - \frac{\partial u_Z}{\partial X} \right)$$
(2.30)

$$\omega_X = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_Y}{\partial Z} - \frac{\partial u_Z}{\partial Y} \right)$$
(2.31)

szczytowa wartość prędkości kątowej dla składowych poziomych

$$PRV_{H} = \frac{\max}{t} \sqrt{RV_{EW}^{2}(t) + RV_{NS}^{2}(t)}$$
(2.32)

gdzie:

 $RV_{EW}(t)$  = składowa *EW* zarejestrowanej prędkości kątowej,  $RV_{NS}(t)$  = składowa *NS* zarejestrowanej prędkości kątowej.

Z ostatnich badań wynika, że udział składowej rotacyjnej drgań jest znaczący przy obliczaniu sił w wysokich i smukłych obiektach, np. kominy wolno stojące. Obliczenia przeprowadzone przez Bońkowskiego, Zembatego i Mincha (2018) z wykorzystaniem rejestracji GRSS GIG drgań rotacyjnych od wstrząsów górniczych, wykazały, że dla wysokiego komina udział składowej rotacyjnej w całej odpowiedzi momentu zginającego wynosił od 18% w górnej części obiektu, do 65% w podstawie komina.



**Rys. 2.11.** Rejestracja drgań rotacyjnych w GZW od wstrząsu sejsmicznego w dniu 12.12.2016 r., godz. 5:33:36, o energii  $E = 5 \cdot 10^6$  J (rejestracja dokonana przez stację sejsmiczną IMI w Dziećkowicach, znajdująca się w archiwum GRSS GIG)

Przykładowe rejestracje drgań rotacyjnych od wstrząsu górniczego w GZW o energii sejsmicznej  $E = 5 \cdot 10^6$  J przedstawiono na rysunku 2.11.

# 3. Czynniki warunkujące intensywność drgań powierzchni

### 3.1. Skale intensywności sejsmicznej

Intensywność sejsmiczna zasadniczo różni się od energii sejsmicznej lub magnitudy z momentu sejsmicznego, stosowanych do oceny wielkości wstrząsu lub trzęsienia ziemi. Energia sejsmiczna i magnituda z momentu sejsmicznego są parametrami charakteryzującymi ognisko wstrząsu lub trzęsienia ziemi. Na przykład trzęsienie ziemi o magnitudzie  $M_W = 6,9$ , do którego doszło 17.01.1995 r. niedaleko miasta Kobe w Japonii (fot. 3.1), nie było w ogóle odczuwane w Europie, natomiast w Kobe i okolicach tego miasta, gdzie trwało około 20 s, wywołało przyspieszenie drgań PGA = 0,8g (tj. prawie 8 m/s<sup>2</sup>) oraz spowodowało ogromne zniszczenia i śmierć prawie 6500 osób. Intensywność drgań w japońskiej skali JMA (*Japan Meteorological Agency*) tego trzęsienia ziemi wynosiła w Europie  $I_{\text{JMA}} = 0$ , natomiast w Kobe  $I_{\text{JMA}} = \text{VII}$ .



Fot. 3.1. Skutki trzęsienia ziemi w Kobe (źródło: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/52/ Hanshin\_Expressway\_Nada\_b059.jpg)

Intensywność sejsmiczną ocenia się w określonym miejscu na powierzchni. Może ona wyrażać opisane werbalnie uszkodzenia zaobserwowane w obiektach budowlanych czy w przyrodzie oraz odczuwanie wstrząsów przez ludzi, wyrażane w stopniach. W tym przypadku mówi się o skalach makrosejsmicznych. Taką skalą jest stosowana w Europie skala EMS-98 (*European Seismological Commission*) opisująca skutki drgań w 12 stopniach intensywności. Skala ta, Decyzją Europejskiej Komisji Sejsmologicznej, zastąpiła w roku 1998 skalę MSK-64. W Ameryce Północnej i Południowej oraz w niektórych innych krajach świata stosuje się zmodyfikowaną skalę Mercallego, MMI (*Modify Mercalli Scale*).

Drugi rodzaj skal kwantyfikuje stopień intensywności na podstawie parametrów pomiarowych drgań. W ostatnich latach bardzo popularną skalą tego typu jest intensywność pomiarowa (ang. *instrumental intensity*) stosowana do interpretacji stopni intensywności, według parametrów wyznaczanych w tzw. *shake maps* (mapy wyrażające intensywność przez parametry prędkości i przyspieszenia drgań obliczane po zaistniałym trzęsieniu ziemi na podstawie bezpośrednich danych pomiarowych i lokalnych relacji tłumienia drgań (Wald i in., 1999b), której stopnie szkodliwości przypisane są ze skali MMI. Skala ta jest dynamicznie rozwijana przez *United States Geological Survey.* W zasadzie można powiedzieć, że w przeszłości takim typem skali była jedna z wersji skali MSK-64, zastąpionej obecnie przez skalę makrosejsmiczną EMS-98. Również japońska siedmiostopniowa skala JMA jest skalą opisowo-pomiarową, w której poszczególnym wartości prędkości i przyspieszenia drgań.

W tabeli 3.1 przedstawiono bardzo popularną i coraz powszechniej stosowaną na świecie pomiarową skalę intensywności (*Instrumental Intensity Scale*), której przypisano stopnie intensywności ze zmodyfikowanej skali Mercallego, I<sub>MM</sub> (Wald i in., 1999a).

				0					
Odczuwanie drgań	brak	słabe	lekkie	średnie	silne	bardzo silne	groźne	potężne	ekstremalne
Potencjalne uszkodzenia	brak	brak	brak	bardzo lekkie	lekkie	średnie	średnie/ ciężkie	ciężkie	bardzo ciężkie
Pik przyspie- szenia: % g	< 0,17	0,17-1,4	1,4-3,9	3,9-9,2	9,2–18	18-34	34-65	65-124	> 124
Pik prędkości: cm/s	< 0,1	0,1-1,1	1,1-3,4	3,4-8,1	8,1-16	16-31	31-60	60-116	> 116
Intensywność pomiarowa	Ι	II–III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

**Tabela 3.1.** Skala intensywności pomiarowej, w której stopnie kwantyfikowane są szczytowymi wartościami prędkości i przyspieszenia drgań, a intensywność opisywana podobnie jak w skali Mercallego

źródło: http://earthquake.usgs.gov/research/shakemap/

#### 3.2. Czynniki wpływające na intensywność sejsmiczną

Wiele czynników wpływa na intensywność drgań powierzchni od zjawisk sejsmicznych indukowanych eksploatacją górniczą (Mutke, 1991; Mutke i Dworak, 1992). Wartość szczytowej amplitudy prędkości i przyspieszenia drgań

31

gruntu zapisanych na powierzchni, zależy od siły wstrząsu (energii sejsmicznej), od tłumienia drgań na drodze od ogniska wstrząsu do punktu rejestracji oraz od lokalnych sejsmogeologicznych warunków panujących w miejscu ich rejestracji (szczególnie od budowy nadkładu luźnych warstw charakteryzujących się niskimi prędkościami propagacji fal poprzecznych *S*). Do powyższych czynników należy dołączyć jeszcze kierunkowość emisji drgań związaną z mechanizmem źródła wstrząsu (Dubiński, Stec i Lurka, 2006), a otrzyma się całościowy obraz niejednorodnego rozprzestrzeniania się drgań sejsmicznych. Przy takim spojrzeniu na efekt propagacji drgań od górniczych wstrząsów sejsmicznych trzeba sobie zdać sprawę z trudności, jaką jest jednoznaczne opisanie parametrów tych drgań, prognozowanych w miejscach, dla których nie dysponuje się rzeczywistymi rejestracjami sejsmometrycznymi.

W rozdziale zostały opisane podstawowe czynniki warunkujące efekt sejsmiczny na powierzchni, takie jak:

- energia sejsmiczna (magnituda),
- tłumienie drgań z odległością od źródła,
- amplifikacja drgań,
- kierunkowość drgań.

Ich przybliżenie jest niezbędne również dla uporządkowania i ujednolicenia pewnych pojęć stosowanych w polskich zagłębiach górniczych, w których występuje sejsmiczność indukowana, tj. w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym (GZW), Lubelskim Zagłębiu Węglowym, Legnicko-Głogowskim Zagłębiu Miedziowym (LGOM) oraz Bełchatowskim Zagłębiu Węgla Brunatnego (BZWB). Powyższe czynniki są związane z parametrami wstrząsów sejsmicznych, na które mają wpływ procesy fizyczne zachodzące w ognisku wstrząsów sejsmicznych i na drodze ich propagacji, ale również interpretacja parametrów drgań z rejestracji sejsmometrycznych. Na pierwszą grupę czynników nie mamy wpływu, ale druga grupa, związana z obliczeniami, jest zależna od stosowanej metodyki. Powinna ona być oparta na dobrze udokumentowanych regułach, opracowanych dla sejsmologii globalnej. Obecnie taką dobrą platformą cyfrową do integracji sejsmiczności indukowanej z globalnymi zjawiskami trzęsień ziemi, jest platforma IS EPOS, utworzona i rozwijana dla sejsmiczności antropogenicznej (ang. *anthropogenic hazard*) w ramach projektu EPOS-ERIC (Lasocki i in., 2016, 2017).

#### 3.2.1. Energia sejsmiczna

Energię sejsmiczną oblicza się bezpośrednio z zarejestrowanych sejsmogramów wstrząsów, w oparciu o całkowanie numeryczne po czasie kwadratu prędkości drgań z fal bezpośrednich (fala podłużna *P* i fala poprzeczna *S*). W celu wyznaczenia całkowitej energii sejsmicznej  $E_c$  obliczenia wykonuje się dla trzech składowych drgań i kilkunastu stacji sejsmicznych. Energia wyznaczona wyłącznie ze składowej pionowej  $E_z$  nie jest energią całkowitą i często znacznie się od niej różni. Podstawową zasadą poprawnego obliczania energii sejsmicznej jest prawidłowe wydzielanie na nieprzesterowanym sejsmogramie grupy fal bezpośrednich *P* i *S*, jeszcze przed operacją całkowania sygnału prędkościowego i wybór rejestracji z dalekiego pola falowego. W dużym uproszczeniu dalekie pole falowe oznacza kilka długości fali, natomiast w funkcji Greena oznacza odległość, dla której amplitudy przemieszczenia maleją jak 1/r i są określane przez fale *P* i *S*, które dochodzą niezależnie od siebie w czasie – czyli zależą od  $r/c_P$  i od  $r/c_s$ . W praktyce inżynierskiej przy wyznaczaniu energii sejsmicznej wstrząsów indukowanych eksploatacją górniczą, wystarczająca będzie aproksymacja pola falowego dalekiego, spełniająca warunek podany przez Brune'a (1970) dla punktowego modelu źródła sejsmicznego

$$\frac{c_{S,P}}{\omega r} \ll 1 \tag{3.1}$$

gdzie:

*c*<sub>*S,P*</sub> – prędkość rozchodzenia się fali poprzecznej, podłużnej, m/s;

 $ω = 2πf_c$ , przy czym  $f_c$  jest częstotliwością narożną, Hz;

r – odległość hipocentralna, m.

W metodzie obliczeniowej uwzględnia się powierzchnię kuli wokół ogniska wstrząsu w odległości  $r_0$  od ogniska, którą ze względu na płytkie wstrząsy indukowane eksploatacją górniczą w GZW, LZW i LGOM, przyjmuje się 500 m tak, aby promień kuli nie wychodził ponad powierzchnię. Jeżeli przez  $v_{S,P}$  oznaczy się prędkość drgań gruntu w grupie fal poprzecznych *S* i podłużnych *P*, to estymowane wartości prędkości drgań na powierzchni kuli  $v_{0,S,P}$  obliczy się z wykorzystaniem wzoru

$$v_{S,P} = v_{0,S,P} C_f q(r) / q(r_0)$$
(3.2)

gdzie:

- $C_f$  amplifikacja na granicy powierzchni ziemi na twardej skale  $C_f$  = 2 (na stacjach podziemnych, gdy sonda pomiarowa umieszczona jest w otworze w twardej skale  $C_f$  = 1),
- *q(r)* funkcja tłumienia, określająca efekty geometrycznego rozprzestrzeniania, pochłaniania oraz odbić fal i ich refrakcji na granicach warstw, przy czym (Gutenberg i Richter, 1956; Kanamori i in., 1993)

$$q(r) = cr^{-n}\exp(-\alpha r) \tag{3.3}$$

gdzie:

n – współczynnik geometrycznego rozprzestrzeniania się fali,

 $\alpha$  – pochłanianie.

Do wyznaczania czasu trwania grupy fal podłużnych i poprzecznych silniejszych wstrząsów górniczych w GZW można wykorzystać wzory Gibowicza (1963):

$$\log(\tau_P) = 0.52 \log(r) - 0.35 \tag{3.4}$$

$$\log(\tau_{\rm S}) = 0.33 \log(r) - 0.08 \tag{3.5}$$

gdzie:

 $\tau_P$  – czas trwania grupy fal podłużnych *P* dla sejsmiczności w GZW,

 $\tau_S$  – czas trwania grupy fal poprzecznych S dla sejsmiczności w GZW.

Przy wyznaczaniu wejścia fali *S* można z kolei skorzystać z formuły opartej na różnicy czasów wejść fali *S* i *P* ( $\tau_{SP}$ )

$$\tau_{SP} = r \left( \frac{v_P - v_S}{v_P v_S} \right) \tag{3.6}$$

gdzie  $\tau_{SP}$  jest czasem od momentu wejścia na sejsmogramie fali P do momentu wejścia fali S.

Współczynniki geometrycznego tłumienia i pochłaniania dla obszaru GZW zostały wyznaczone przez Dubińskiego i Wierzchowską (1973) i wynoszą:

- dla fali podłużnej:  $n_P = 1,083$ ;  $\alpha_P = 1,89 \cdot 10^{-5}$ , km<sup>-1</sup>,
- dla fali poprzecznej:  $n_S = 1,067$ ;  $\alpha_S = 1,65 \cdot 10^{-5}$ , km<sup>-1</sup>.

Zależność między energią sejsmiczną określonej grupy falowej a jej parametrami określanymi z sejsmogramu można, w domenie czasu, zapisać następująco (Kanamori i in., 1993)

$$E_{S} = 4\pi r^{2} C_{f}^{-2} \left[ \frac{r_{0}q(r_{0})}{rq(r)} \right]^{2} \rho_{0} c_{0,S,P} \int_{t_{1,S,P}}^{t_{2,S,P}} \sum v_{S,P}^{2} dt$$
(3.7)

gdzie:  $\sum v_{S,P}^2$  oznacza sumę kwadratów prędkości składowych poziomych *NS*, *EW* (lub prostopadłych do siebie *X* i *Y*, ustawionych w poziomie oraz składowej pionowej *Z*).

W metodyce obliczeń stosowanej w warunkach GZW (Dubiński i Wierzchowska, 1973) wartość gęstości energii  $\varepsilon(r)$  w punkcie obserwacyjnym sprowadza się do wartości odniesienia  $\varepsilon(r_0)$  na kuli odniesienia. Dla wyznaczonych wartości współczynników *n* i  $\alpha$  wyznacza się funkcję tłumienia gęstości energii, zwykle proporcjonalną do kwadratu funkcji tłumienia amplitudy

$$f_{\varepsilon}(r) = r^{-2n} \mathrm{e}^{-2\alpha r} \tag{3.8}$$

stąd dla promienia kuli odniesienia  $r_0$  = 500 m otrzymuje się

$$\frac{\varepsilon(r_0)}{\varepsilon(r)} = (2r)^{2n} \mathrm{e}^{\alpha(2r-1)} \tag{3.9}$$

i z kolejnego przekształcenia

$$\varepsilon(r_0) = \varepsilon(r)F(r) \tag{3.10}$$

gdzie  $F(r) = (2r)^{2n} e^{\alpha(2r-1)}$ ,

a funkcja gęstości  $\varepsilon(r)$  obliczana jest za pomocą wzoru

$$\epsilon(r) = \rho c \int_{t_{1,P,S}}^{t_{2,P,S}} v_{S,P}^2(t) dt$$
(3.11)

gdzie:

ρ – gęstość ośrodka skalnego,

 $v^{2}(t) = v_{Z}^{2}(t) + v_{NS}^{2}(t) + v_{EW}^{2}(t);$ 

w przypadku wyznaczania energii sejsmicznej wyłącznie ze składowej pionowej *Z*, składowe poziome redukują się:  $v^2(t) = v_Z^2(t)$ .

Przyjmując następnie, że całkowanie wielkości  $\varepsilon(r_0)$  po powierzchni kulistej można zastąpić przemnożeniem tej wielkości przez powierzchnię kuli o promieniu  $r_0$ , dla promienia odniesienia  $r_0 = 500$ , otrzymuje się (Dubiński i Wierzchowska, 1973)

$$E = \pi 10^6 \varepsilon(r) F(r) \tag{3.12}$$

Energia całkowita na stanowisku sejsmicznym równa się sumie energii z grupy fal bezpośrednich podłużnych i poprzecznych. Wyniki obliczeń energii sejsmicznej z poszczególnych stanowisk  $E_{st}$  są uśredniane arytmetycznie:

$$E_i = E_P + E_S \tag{3.13}$$

$$E_{c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} E_{i}$$
 (3.14)

gdzie:

*i* – numer stanowiska,

*n* – liczba stanowisk.

Drugim sposobem energia może być obliczana w domenie częstotliwości (Boatwright i Fletcher, 1984)

$$E_s = 4\pi C^2 r^2 \rho c_{S,P} \int_0^\infty v(\omega)_{S,P}^2 \,\mathrm{d}\omega \tag{3.15}$$

gdzie prędkość drgań gruntu  $v(\omega)$  jest skorygowana przed całkowaniem na tłumienie, *C* jest średnim współczynnikiem radiacji fal sejsmicznych [średni współczynnik radiacji wynosi (Aki i Richards, 1980): 0,52 dla fali *P* i 0,63 dla
fali *S*]. Średnia wartość jest niezależna od orientacji kierunku rozrywu, a dla fali *S* jest reprezentowana jako wypadkowe drgania dla fal poprzecznych *SH* i *SV*. We wzorze (3.15) *r* jest odległością hipocentralną, a  $\rho$  i  $c_{S,P}$  są gęstością i prędkością fali *S* lub *P* pod czujnikiem drgań. Tłumienie ośrodka uwzględniane w sejsmogramie przed całkowaniem wynosi

$$D(f,r) = \exp\left(-\frac{\omega r}{c_{S,P}Q}\right)$$
(3.16)

gdzie:

*Q* – współczynnik dobroci związany z tłumieniem przez ośrodek nieidealnie sprężysty;

f – częstotliwość drgań, s<sup>-1</sup>;

*r* – odległość hipocentralna, m;

*c*<sub>*S,P*</sub> – prędkość propagacji fali w górotworze, m/s.

W metodyce obliczeń energii sejsmicznej z wykorzystaniem analizy spektralnej sejsmogramów bardzo często procedura jest ograniczona tylko do grupy fal *S*. Spowodowane jest to poglądem, że energia wypromieniowana w postaci fal *P* stanowi bardzo mały ułamek energii niesionej przez fale *S* (Boatwright i Fletcher, 1984). Tak przynajmniej jest w naturalnych trzęsieniach ziemi, gdzie  $E_S/E_P$  zmienia się w granicach 10–30. Dla zjawisk pochodzenia górniczego stosunek ten jest zwykle mniejszy od 10 (Gibowicz, Harjes i Schäfer, 1990) i grupę fal sejsmicznych podłużnych należy też oceniać pod względem energetycznym.

Całkowita energia sejsmiczna wstrząsu powinna być wyznaczana z kilku lub kilkunastu stanowisk pomiarowych, najlepiej o różnych wartościach azymutu ognisko-stanowisko i następnie uśredniana. Do wyznaczania energii sejsmicznej muszą być wybierane tylko rejestracje ze stanowisk pomiarowych usytuowanych w dalekim polu falowym, które równocześnie nie są przesterowane.

Energia sejsmiczna obliczana jest przy przyjęciu wielu upraszczających założeń, które wpływają na małą dokładność wyznaczanego parametru, wynoszącą około ½ rzędu wielkości.

Czynniki, które wpływają na wyniki obliczania energii sejsmicznej, są następujące (Dubiński, 1995):

- wydzielanie grup falowych,
- określanie parametrów drgań (prędkości drgań i czasu trwania grupy falowej),
- znajomość parametrów sejsmologicznych masywu skalnego, w którym ma miejsce propagacja fal sejsmicznych (gęstość, funkcja tłumienia, prędkość rozchodzenia się określonych grup falowych),

- charakterystyka radiacji sejsmicznej źródła,
- amplifikacja drgań przez nadkład bezpośrednich warstw podłoża, na których zlokalizowany jest miernik drgań,
- charakterystyka kanału pomiarowego.

Poprawne wyznaczenie energii sejsmicznej ma również ogromne znaczenie jako parametr wykorzystywany do prognozowania drgań powierzchni. Energia jest bowiem podstawowym parametrem, oprócz odległości hipocentralnej, w relacjach tłumienia służącym do wyznaczania prędkości i przyspieszenia drgań powierzchni, tzw. GMPE (ang. *ground motion prediction equation*) oraz do statystycznej prognozy sejsmiczności opracowywanej dla planów projektowanej eksploatacji. Relacje tłumienia GMPE są ważne z tego powodu, że rzeczywiste parametry drgań są znane jedynie w miejscach pomiarów sejsmometrycznych, natomiast informacje o parametrach drgań w całym pozostałym obszarze można prognozować tylko z tych relacji i w ten sposób wyznaczać mapy drgań po zaistniałym wstrząsie górniczym.

## Magnituda lokalna

W literaturze trzęsień ziemi wielkość słabych i średnich trzęsień wyraża się za pomocą magnitudy lokalnej, która jest związana z wyemitowaną energią sejsmiczną.

Magnituda trzęsień ziemi dla obszaru Kalifornii została opracowana przez Richtera (1935) i definiowała lokalną magnitudę zjawiska sejsmicznego  $M_L$ na stacji sejsmicznej jako

gdzie:

$$M_L = \log A(r) - \log A_0(r)$$
 (3.17)

- *A* maksimum amplitudy mierzonej od 0 do piku na sejsmografie Wooda -Andersona w odległości epicentralnej *r<sub>e</sub>*,
- $A_0$  referencyjna maksymalna amplituda dla odległości  $r_e$  zarejestrowana podczas trzęsienia ziemi o magnitudzie zerowej.

Z każdą jednostką magnitudy lokalnej wydatek energii sejsmicznej zwiększa się 32-krotnie, a pozioma amplituda drgań zwiększa się 10-krotnie.

Określono relacje skalowania między magnitudą lokalną a energią dla sejsmiczności indukowanej w obszarze GZW, opracowane przez Dubińskiego i Wierzchowską (1973)

$$\log(E_c) = 1,9M_L + 1,8 \tag{3.18}$$

Taki wzór dla LGOM został podany w publikacji Rudzińskiego i Dinevy (2017)

$$M_L = 0,525 \log(E_c) - 0,07$$

lub po przekształceniu

$$\log(E_c) = 1.9M_L - 0.13$$

co wyraźnie pokazuje, że w obszarze LGOM wydatek energii całkowitej jest niższy niż w GZW dla tej samej magnitudy.

## Magnituda momentu sejsmicznego

Przy dużych trzęsieniach ziemi (M > 7) skala Richtera jest "spłaszczana" i nie odzwierciedla ich faktycznej wielkości. W związku z tym dla silnych trzęsień ziemi w roku 1979 Thomas Hanks i Hiroo Kanamori wprowadzili magnitudę z momentu sejsmicznego. Do jej obliczenia niezbędna jest znajomość momentu sejsmicznego  $M_0$  wyrażanego w N·m.

Skalarny moment sejsmiczny  $M_0$  jest miarą niesprężystej deformacji kosejsmicznej w źródle wstrząsu. Jest to bardzo ważny parametr, wyznaczany niezależnie od energii sejsmicznej. Jest on definiowany dla płaskiego zastępczego źródła jako (Gibowicz i Kijko, 1994)

$$M_0 = \mu \bar{u}A \tag{3.19}$$

gdzie:

- $M_0$  skalarny moment sejsmiczny,
- $\mu$  moduł sztywności postaciowej,
- $\bar{u}$  średnie przemieszczenie na płaszczyźnie rozrywu,
- *A* kołowa powierzchnia rozrywu.

Obliczenia skalarnego momentu sejsmicznego dokonuje się w domenie częstotliwości, wyznaczając tzw. poziom niskoczęstotliwościowej części widma przemieszczenia w dalekim polu dla fal *P* i *S*. Związek skalarnego momentu sejsmicznego z widmem przemieszczenia w polu dalekim jest następujący

$$M_0 = \frac{4\pi\rho\beta^3\Omega_0 R}{F_S} \tag{3.20}$$

gdzie:

- *R* odległość hipocentralna, m;
- β prędkość propagacji fali poprzecznej *S*, m/s;
- ρ gęstość objętościowa, kg/m<sup>3</sup>;
- $F_s$  funkcja uwzględniająca kierunkowy charakter emisji fal objętościowych ze źródła.

Obecnie najczęściej używaną wielkością w trzęsieniach ziemi jest magnituda liczona z momentu sejsmicznego  $M_w$  (Hanks i Kanamori, 1979)

$$M_w = \frac{2}{3}\log(M_0) - 6,07 \tag{3.21}$$

W badaniach prowadzonych w ramach pracy statutowej Głównego Instytutu Górnictwa została określona zależność empiryczna dla obszaru Górnego Śląska między całkowitą energią sejsmiczną  $E_c$  i magnitudą momentu sejsmicznego  $M_0$  (Holeczek i Mutke, 2016)

$$\log(E_c) = 2,41M_w + 0,51 \tag{3.22}$$

Energia sejsmiczna jest inną miarą wielkości wstrząsu/trzęsienia ziemi niż magnituda z momentu sejsmicznego (Bormann i in., 2009). Ponieważ energia liczona jest bezpośrednio z kwadratu prędkości drgań, jest ona dobrą miarą potencjalnych uszkodzeń obiektów budowlanych, natomiast  $M_w$  liczona jest z niskoczęstotliwościowego poziomu spektrum przemieszczeniowego i fizycznie związana z całkowitym statycznym przemieszczeniem w źródle wstrząsu/trzęsienia ziemi.

#### 3.2.2. Tłumienie drgań ze wzrostem odległości

Relacja tłumienia intensywności drgań *I* ze wzrostem odległości może być wyrażona w formie funkcji tłumienia od magnitudy (lub logarytmu energii) i odległości hipocentralnej. Taka relacja przyjmuje następującą postać funkcyjną (Musson i Cecić, 2011)

$$I = \mathbf{a} + \mathbf{b}M_L + \mathbf{c}\log(r) + \mathbf{d}r \tag{3.23}$$

gdzie:

a, b, c, d – stałe współczynniki dla analizowanego obszaru,

 $M_L$  – magnituda lokalna,

r – odległość hipocentralna.

Intensywność pomiarowa może zależeć od szczytowej amplitudy drgań (przemieszczenia – *PGD*, prędkości – *PGV* lub przyspieszenia – *PGA*), w literaturze przedmiotu funkcjonują więc najczęściej równania predykcyjne, opracowane bezpośrednio dla tych parametrów drgań, tzw. GMPE. Równania te, zwane często relacjami tłumienia lub funkcjami tłumienia, rozwijane są od kilkudziesięciu lat i można spotkać wiele modeli funkcji oraz dziesiątki ich modyfikacji do warunków sejsmiczności lokalnej.

Gdy przyjmie się, że *y* jest szczytową amplitudą (np. *PGA*, *PGV*), *r* odległością hipocentralną, natomiast *M* magnitudą, to relacja w postaci funkcji ogólnej przyjmuje postać

$$y = f(M, r) \tag{3.24}$$

Postać funkcji ogólnej bazuje najczęściej na przyjęciu fizycznego modelu tłumienia drgań, na które składa się rozpraszanie geometryczne i pochłanianie (Gutenberg i Richter, 1956; Kanamori i in., 1993) wyrażone wzorem (3.3) oraz wzrost amplitudy drgań w funkcji magnitudy k(M). Otrzymuje się formę równania stosowaną przez wielu autorów dla relacji tłumienia (np. Joyner i Boore, 1981, 1988; Brillinger i Preisler, 1985)

$$y = k(M)r^{-n}e^{-\alpha r} \tag{3.25}$$

gdzie  $r = \sqrt{r_e^2 + h^2}$ , przy czym *h* jest głębokością ogniska trzęsienia ziemi/ wstrząsu górniczego.

Należy zwrócić uwagę, że tłumienie drgań przedstawione we wzorach (3.24) i (3.25) odnosi się do szczytowych amplitud drgań gruntu. Wiele sejsmicznych stanowisk powierzchniowych w polskich zagłębiach górniczych zainstalowanych jest w budynkach. Każdy typ budynku inaczej przenosi drgania z podłoża na skutek interakcji grunt-budynek. W szczególności obiekty budowlane o dużych rozmiarach rzutu poziomego i o znacznej wysokości, istotnie zmieniają charakterystykę amplitudowo-częstotliwościową drgań dochodzących do obiektu. Wykorzystywanie w relacjach tłumienia rejestracji drgań mieszanych z gruntu i różnych budynków prowadzi do błędnego określania prognozowanych drgań gruntu na podstawie tak wyznaczonych relacji tłumienia. Do opracowywania relacji tłumienia szczytowych drgań gruntu mogą jedynie być wykorzystywane rejestracje z budynków o małych rozmiarach rzutu poziomego i pionowego, dla których za pomocą pomiarów udokumentowano, że funkcja przejścia drgań z gruntu na fundament budynku w zakresie częstotliwości od 1 do 10 Hz jest zbliżona do jedności. Warunek ten oznacza brak tłumienia drgań w paśmie do 10 Hz przez fundament budynku. Oczywiście można próbować konstruować lokalne relacje dla drgań w obiektach budowlanych, jednak należy wówczas wyraźnie to zaznaczyć i wybrać rejestracje drgań z jednego typu obiektów budowlanych charakteryzujących się podobną funkcją przejścia drgań z gruntu na fundament budynku.

Przegląd dotychczasowych równań GMPE opracowanych dla trzęsień ziemi i nielicznych dla wstrząsów indukowanych eksploatacją górniczą, można znaleźć w opracowaniu Douglasa (2018). Poniżej przedstawiono kilka modeli równań GMPE stosowanych również w polskich zagłębiach górniczych. 3.2.2.1. Modele równań GMPE do prognozowania drgań gruntu

#### Esteva i Rosenblueth

Równanie zaproponowane przez Estevę i Rosenbluetha (1964) uwzględnia wprost rozpraszanie geometryczne z odległością i wzrost parametru *PGA* ze wzrostem magnitudy w funkcji eksponencjalnej

$$PGA = c \exp(\alpha M_L) r^{-\beta}$$
(3.26)

gdzie:

 $c, \alpha, \beta$  – współczynniki; współczynnik  $\beta$  kontroluje tłumienie geometryczne, *PGA* – szczytowa wartość przyspieszeń drgań.

## Campbell

$$PGA = a \exp(bM)[r + c_1 \exp(c_2M)]^{-d}$$
 (3.27)

gdzie:

a, b, c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub> – stałe współczynniki,

*M* – magnituda.

Campbell (1981) wykorzystuje ww. postać funkcji, ponieważ jest w stanie modelować możliwe nieliniowe skalowanie odległości w bliskim polu falowym. Właściwości dalekiego pola falowego we wzorze są charakteryzowane przez współczynnik b, który kontroluje skalę magnitudy i przez współczynnik d, który kontroluje tłumienie geometryczne. Z kolei wyrażenie  $c_1 exp(c_2 M)$  kontroluje tłumienie w odległościach bliskich źródła sejsmicznego.

#### Joyner i Boore

Joyner i Boore (1981, 1988), Boore, Joyner i Fumal (1993, 1997), Boore (2004, 2005) otrzymali swoje równania po zlogarytmowaniu (3.25) i dodaniu liniowego wyrażenia związanego z magnitudą:

$$\log PGA = \beta M - p \log r + \gamma r + \alpha S + \varepsilon$$
(3.28)

$$\log PGA = \beta \log E - p \log r + \gamma r + \alpha S + \varepsilon$$
(3.29)

gdzie:

*E* – energia sejsmiczna wstrząsów, J;

- r odległość hipocentralna [m];  $r = (r_e^2 + h_s^2)^{0.5}$ , przy czym  $r_e$  to odległość epicentralna [m], a  $h_s$  to średnia głębokość zjawisk sejsmicznych, która minimalizuje sumę kwadratów reszt;
- $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  współczynniki estymowane z obserwacji sejsmometrycznych;
- ε składnik losowy; reprezentuje wpływ na poszukiwany parametr wszystkich czynników pominiętych w równaniu;

p log r – wyraz związany z tłumieniem (rozpraszaniem) fali sejsmicznej;

- γr wyraz związany z pochłanianiem fali sejsmicznej (tłumienie niesprężyste);
- α*S* klasyfikator gruntu, np. 0 dla podłoża skalnego (ang. *hard rock*) i 1 dla gruntów z innych klas (ang. *soft rock*).

W regresji liniowej miarą dobroci dopasowania modelu do danych rejestrowanych jest współczynnik determinacji i błąd standardowy estymaty. Współczynnik determinacji określa w jakim procencie model wyjaśnia obserwacje sejsmometryczne, natomiast błąd standardowy estymaty charakteryzuje losowy rozrzut wartości losowych wokół linii regresji.

W równaniu (3.28) Joyner i Boore współczynnik p przyjmują równy –1. Przyjęcie współczynnika geometrycznego rozprzestrzeniania frontu falowego równego –1 może być dyskusyjne z powodu różnych wartości tego współczynnika dla różnych typów fal. Jednak w przypadku wstrząsów górniczych główny efekt sejsmiczny wywoływany jest falami bezpośrednimi typu poprzecznego *S*, które charakteryzują się spadkiem amplitud związanym z geometrycznym rozpraszaniem frontu falowego według formuły 1/r. Do estymacji współczynników amplifikacji drgań sejsmicznych wykorzystuje się metodę regresji wielokrotnej.

W każdym z podanych równań linia regresji reprezentuje oszacowanie wartości oczekiwanej zmiennej log *PGA*, ale w 50% przypadków zarejestrowane drgania rzeczywiste ją przekraczają. Ponieważ równania (3.28) i (3.29) są równaniami liniowymi, proponuje się, aby wartości regresji obliczać jako kwantyle rzędu 0,50 i 0,84 w funkcji odległości, energii sejsmicznej i budowy nadkładu warstw geologicznych. Wówczas kwantyl 0,5 jest szacowaniem średniej arytmetycznej wartości amplitudy drgań, natomiast kwantyla rzędu 0,84 proponuje się używać do szacowania prognozowanych wartości amplitud, tak jak sugerują Joyner i Boore (1981). Kwantyl rzędu 0,84 oznacza bowiem, że 84% mierzonych wartości *PGA* znajdzie się poniżej wartości obliczonej dla tego kwantyla. Inną metodą obliczeń, jakie wartości prawdopodobnie nie zostaną przekroczone (z zadanym prawdopodobieństwem, np. p = 0,84), jest wyznaczenie górnej granicy tzw. przedziału ufności dla predykcji (Lasocki i in., 2000).

Model Joynera i Boore'a to model najczęściej wykorzystywany w polskich kopalniach do opracowywania lokalnych relacji tłumienia (Lasocki i in., 2000; Speczik i in., 2003; Mutke i Stec, 2008; Olszewska, 2008; Lasocki, 2013; Bańka, 2014; Bańka, Kołodziejczyk i Lier, 2016; Lurka, Gierlotka i Siata, 2019). Ze względu na powszechne określanie siły wstrząsu sejsmicznego w polskim górnictwie przez energię sejsmiczną, w równaniu (3.29) magnitudę zastępuje się przez log(E).

#### **Bolt i Abrahamson**

Bolt i Abrahamson (1982) zmodyfikowali równanie na tłumienie przez dodanie dodatkowego parametru d. Ta formuła funkcyjna tłumienia pozwala na oddzielenie zmian tłumienia w polu dalekim od zmian tłumienia w polu bliskim. Nieliniowa regresja wykonana na danych używanych przez Joynera i Boore'a (1981) wykazała spłaszczenie krzywej tłumienia w pobliżu źródła i brak istotnego wpływu zwiększenia magnitudy powyżej M = 7,0 na wzrost przyspieszenia w polu bliskim

$$PGA = a[(r+d)^{2} + 1]^{c}e^{-b(r+d)}$$
(3.30)

gdzie: a, b, c, d – współczynniki stałe.

W równaniu (3.30) wybrana forma równania spełnia możliwe do przyjęcia założenia fizyczne (Douglas, 2018). W rozwiązaniu zaproponowanym przez Bolta i Abrahamsona dane podzielone są na wąskie klasy magnitud M (5–6, 6–7, 7–7,7). Tłumienie geometryczne kontroluje współczynnik c, współczynnik d jest związany z głębokością ognisk trzęsienia ziemi, natomiast współczynnik b z pochłanianiem. Miejsce przegięcia relacji tłumienia z części płaskiej w polu bliskim do nachylonej w polu dalekim kontroluje współczynnik c i zmniejsza w ten sposób wpływ współczynnika d (głębokości) na kształt spłaszczenia krzywej w strefie pola bliskiego. Narzuca większy wpływ współczynnika pochłaniania b na kształt krzywej w polu bliskim.

#### Si i Midorikawa

Si i Midorikawa (2000) proponują inne podejście do zagadnienia relacji tłumienia. Polega ono na zastosowaniu regresji, w której analizie poddawane są zarówno czynniki wynikające z rodzaju źródła wstrząsu (wielkości magnitudy/ energii sejsmicznej, mechanizmu ogniska), drogi propagacji fali, jak również z lokalnych warunków geologicznych

gdzie:

$$\log(y) = b - \log(r) - kr \tag{3.31}$$

*y* – poszukiwany parametr sejsmiczny *PGA* lub *PGV*,

r – odległość od źródła,  $r = \sqrt{r_e^2 + bh^2}$ ,

*b* – współczynnik offsetowy,

log(*r*) – nieliniowe rozpraszanie geometryczne,

*kr* – pochłanianie.

Przekształcając równanie (3.31) wyznacza się wartość parametru offsetowego *b* dla każdego zarejestrowanego zjawiska

gdzie:

- *S*<sub>*i*</sub> klasyfikator gruntu przyjmujący wartość jeden dla danej kategorii gruntu lub zero dla pozostałych (zmienna jakościowa),
- r odległość od źródła.

Wykorzystując analizę regresji można wyznaczyć współczynniki  $a_1-a_4$ i ostatecznie uzyskać rozkład wartości przyspieszenia lub prędkości drgań na powierzchni w zależności od magnitudy/energii wstrząsu, odległości od źródła oraz lokalnych warunków geologicznych. Model ten został wykorzystany do opracowania regionalnych relacji tłumienia w GZW, z uwzględnieniem podziału podłoża na klasy gruntu według normy Eurokod 8 (Chodacki, 2013, 2014, 2016).

#### Campbell i Bozorgnia

Campbell i Bozorgnia (2014) proponują modele bardzo rozbudowane, uwzględniające w prognozie drgań *PGA* (dla mediany), oprócz odległości i magnitudy, takie dodatkowe czynniki, jak mechanizm ognisk wstrząsów, prędkość propagacji drgań  $V_{S30}$ , klasa podłoża.

Wstrząsy sejsmiczne indukowane lub aktywowane działalnością górniczą są zdecydowanie słabsze i płytsze niż trzęsienia ziemi, charakteryzują się więc inną propagacją drgań gruntu. Szczególne znaczenie ma mała głębokość (do 3 km), co powoduje, że wstrząsy indukowane charakteryzują się innymi parametrami źródła sejsmicznego, szybciej się wytłumiają poza strefą epicentrum, ze względu na wyższe częstotliwości drgań, w epicentrum mogą występować efekty bliskiego pola falowego, co ma wpływ na współczynnik geometrycznego tłumienia itp. Z tego powodu po roku 2010 powstało kilka modeli funkcji GMPE skonstruowanych specjalnie dla płytkich wstrząsów indukowanych eksploatacją górniczą lub geotermią (Douglas i in., 2013; Sharma i in., 2013; Atkinson, 2015; Bommer i in., 2016). Poniżej zaprezentowano dwa rozwiązania, które upoważniają do ekstrapolacji obliczeń na wyższe magnitudy, opracowane dla warunków lokalnych jako wynik ryzyka sejsmicznego.

# Douglas, Edwards, Convertito, Sharma, Tramelli, Kraaijpoel, Cabrera, Maercklin i Troise

Został zaproponowany model dla wstrząsów indukowanych, o magnitudach zdecydowanie mniejszych (M < 4) niż magnitudy średnich i silnych trzęsień ziemi, dla których głównie stosowane są przedstawione wyżej modele (Douglas i in., 2013)

$$\ln y = a + bM + c \ln \sqrt{r_{\rm hyp}^2 + h^2} + dr_{\rm hyp}$$
(3.33)

gdzie:

 $r_{\rm hyp}$  – odległość hipocentralna,

a, b, c, d, h – współczynniki.

Douglas i inni otrzymali relację dość uniwersalną z danych ze 119 stacji rejestrujących sejsmiczność indukowaną w Bazylei w Szwajcarii (geotermia), w Geysers w USA, w Soultz-sous-Forêts we Francji oraz na polach gazowych w Holandii. Autorzy ci uzyskali rozwiązanie dla y w m/s<sup>2</sup>:  $a = -5,984 \pm 0,427$ ,  $b = 2,146 \pm 0,069$ , c =  $-1,772 \pm 0,208$ ,  $h = 2,511 \pm 0,595$ ,  $d = -0,023 \pm 0,011$ ,  $\sigma = 1,147$ .

## Bommer, Dost, Edwards, Stafford, van Elk, Doornhof i Ntinalexis

Bommer i inni (2016) zaproponowali postać funkcji dla wstrząsów indukowanych eksploatacją gazu w polu Groningen w Holandii

$$\ln y = c_1 + c_2 M + c_3 (M - M_{\rm sr})^2 + c_4 \ln \sqrt{R_{\rm epi}^2 + [\exp(c_5 M + c_6)]^2}$$
(3.34)

gdzie:

 $M_{\rm sr}$  – przyjęta średnia magnituda 4,5,

 $R_{\rm epi}$  – odległość epicentralna,

*c*<sub>1</sub>–*c*<sub>6</sub> – współczynniki.

Wzór (3.34) zawiera wyrażenie na nieliniowe skalowanie magnitudy, które przyjmuje różną wartość dla małych i dużych magnitud. Cała relacja skalowania jest więc liczona dla warunku  $M \le M_{sr}$  i dla  $M \ge M_{sr}$ .

# 3.2.2.2. Równania wykorzystywane do prognozowania drgań gruntu w polskich zagłębiach górniczych

## Górnośląskie Zagłębie Węglowe (GZW)

W GZW monitoring drgań powierzchni rozwijał się bardzo intensywnie na początku XXI wieku wraz z rozwojem aparatury sejsmometrycznej WORS oraz AMAX-GSI produkcji GIG i aparatury ARP 2000 produkcji EMAG. Ponadto w ramach różnych projektów infrastrukturalnych, w tym projektu EPOS-PL, rozszerzono dotychczasową sieć sejsmologiczną GRSS o niezależny system do ciągłej obserwacji, składający się z 15 powierzchniowych stacji sejsmometrycznych pięciosekundowych i z 10 stacji akcelerometrycznych, w tym pięciu otworowych do badania zjawiska amplifikacji drgań. System ten jest oparty na aparaturze zaprojektowanej przez firmę GeoSIG. Kopalnie systematycznie wyposażały się w sprzęt pomiarowy i obecnie istnieje ponad 100 lokalnie

rozmieszczonych powierzchniowych stacji sejsmometrycznych mierzących przyspieszenie i prędkość drgań gruntu. Na obszarach kopalń, w których występują wstrząsy indukowane działalnością górniczą, takie obserwacje dokumentowane są przez geofizyków. Następnie opracowywane są lokalne wzory do prognozowania szczytowych prędkości drgań poziomych *PGV*<sub>Hmax</sub> lub szczytowych wartości przyspieszenia drgań w paśmie do 10 Hz *PGA*<sub>H10</sub>. Wybór tych parametrów związany jest z ich stosowaniem do oceny stopnia intensywności i stopnia szkodliwości drgań według Górniczej Skali Intensywności Sejsmicznej GSIS-2017 i jej starszych wersji.

Zanim jednak na obszarze GZW przedsiębiorcy górniczy zainstalowali tak liczne stacje sejsmometryczne, monitoring drgań opierał się głównie na Górnośląskiej Regionalnej Sieci Sejsmologicznej GIG i kilku przenośnych rejestratorach. W latach 80. i 90. ubiegłego wieku baza pomiarowa była zdecydowanie skromniejsza. Przeprowadzono w tamtym czasie pomiary drgań od wstrząsów górniczych w wybranych miejscach podłoża skalnego (bez nadkładu czwartorzędowego), w tym wiele silnych wstrząsów zarejestrowano w strefie epicentralnej tych zjawisk sejsmicznych. Sztywne podłoże skalne oznacza, że prędkość propagacji fal poprzecznych w podłożu jest większa niż  $V_S$  = 800 m/s. Pierwsze równania uniwersalne o charakterze regionalnym dla obszaru GZW zostały opracowane przez Mutke (1991). Równania te służą do prognozowania szczytowych poziomych drgań twardego skalnego podłoża, w funkcji energii sejsmicznej w epicentrum i do wyznaczania tłumienia drgań ze wzrostem odległości. Są to równania nieliniowe i zostały opracowane dla zakresu  $2 \cdot 10^5$  J  $\leq E \leq 5 \cdot 10^8$  J i odległości epicentralnej do 10 km (Mutke, 1991):

$$PGV_{Hrepi} = 0,00148 \ (\log E)^{1,29} - 0,011 \tag{3.35}$$

$$D_{Hrv} = 1,55r^{0,135} \exp(-0,77r) + 0,04$$
(3.36)

$$PGV_{Hrock} = PGV_{Hrepi}D_{Hrv}$$
(3.37)

gdzie:

*E* – energia sejsmiczna wstrząsu, J;

*PGV*<sub>Hrock</sub> – szczytowe amplitudy prędkości drgań poziomych skalnego podłoża, m/s;

*PGV*<sub>Hrepi</sub> – szczytowe amplitudy prędkości drgań poziomych skalnego podłoża w strefie epicentrum, m/s;

 $D_{Hrv}$ – regresja tłumienia względnego w funkcji odległości r, przy czym  $r^2 = r_e^2 + 0.5^2$  km, gdzie 0.5 km jest średnią głębokością eksploatacji pokładów węgla.

Korelacja rangowa dla równania (3.35) wynosi: korelacja Spearmana: E = 1,  $PGV_{Hrepi} = 0,984$ ; korelacja Kendalla: E = 1,  $PGV_{Hrepi} = 0,934$ .

Korelacja rangowa dla równania (3.36) wynosi: korelacja Spearmana: r = 1,  $PGV_{Hrepi} = -0,969$ ; korelacja Kendalla: r = 1,  $PGV_{Hrepi} = -0,864$ .

Dodatnia wartość współczynnika potęgowego w równaniu (3.36) przy *r*, wpływającego na geometryczne rozprzestrzenianie frontu falowego, mija się z oczekiwaniem, by zawsze był ujemny. Wyjaśnieniem może być, że niesprężyste tłumienie wyrażone przez współczynnik odpowiedzialny za pochłanianie, dominuje w rozkładzie i w efekcie decyduje o tłumieniu ze wzrostem odległości.

Przedstawione równania (3.35)–(3.37) są traktowane jako uniwersalne dla obszaru GZW, ponieważ ostateczny efekt drgań sejsmicznych powierzchni w dowolnym miejscu GZW jest wyznaczany po obliczeniu współczynnika amplifikacji drgań przez warstwy nadkładu charakteryzujące się małą prędkością propagacji fal poprzecznych (zwykle w GZW jest to nadkład warstw czwartorzędowych). Na wartość szczytowych amplitud  $PGV_{Hmax}$  istotnie wpływa współczynnik amplifikacji drgań w badanym miejscu  $W_{amp}$ . Wartość tego współczynnika zależy od miąższości warstw nadkładu i częstotliwości drgań padających (długości fali). Prognozowana wartość szczytowej amplitudy prędkości drgań poziomych  $PGV_{Hmax}$  wyniesie (Mutke i Dworak, 1992)

$$PGV_{Hmax} = PGV_{Hrock}W_{amp}$$
 (3.38)

Na rysunku 3.1 widoczne są wartości mediany krzywych regresji szczytowych amplitud prędkości poziomych drgań podłoża skalnego, wyznaczone według równania (3.37), wyrysowane dla czterech wartości energii sejsmicznej



**Rys. 3.1.** Wykres prognozowanych wartości mediany szczytowych amplitud prędkości drgań poziomych podłoża skalnego *PGV*<sub>Hrock</sub> dla czterech zakresów energii sejsmicznej – według wzoru (3.37)

wstrząsów, tj.  $1 \cdot 10^6$  J,  $1 \cdot 10^7$  J,  $1 \cdot 10^8$  J i  $1 \cdot 10^9$  J. Można zauważyć płaską część krzywej regresji w epicentrum i stosunkowo szybki spadek amplitud drgań, prawie 10-krotny w odległości 4 km od epicentrum.

Nowe wzory dla najsilniejszych wstrząsów od 10<sup>6</sup> do 10<sup>9</sup> J dla obszaru GZW, pozwalające na uwzględnianie wpływu amplifikacji przez nadkład, opracował Chodacki (2013). W swojej rozprawie doktorskiej przedstawił rozwiązanie oparte na modelu (3.31) i (3.32), opracowanym przez Si i Midorikawę (2000). Uwzglednił przy tym trzy klasy gruntu A, B i C, przyjete w normie dla projektowania na terenach sejsmicznych Eurokod 8. Należy podkreślić, że autor dysponował obszerną bazą pomiarową silnych wstrząsów zarejestrowanych przez Górnośląską Regionalną Sieć Sejsmologiczną GIG i przez stacje sejsmometryczne AMAX-GSI (razem 51 stanowisk trójskładowych), o energii sejsmicznej od  $E = 1.10^{6}$  J (M = 2.2) do  $E = 1.10^{9}$  J (M = 4.1); w sumie do dyspozycji miał 350 rejestracji. Pod każdym stanowiskiem rejestracyjnym była wyznaczana, techniką pomiarową MASW (Siata i Chodacki, 2005), prędkość propagacji fali S w nadkładzie do 30 m, tzw.  $V_{S30}$ , parametr niezbędny do klasyfikacji podłoża według Eurokod 8. Cztery klasy podłoża opisane w normie Eurokod 8 charakteryzują się zakresami parametru prędkości propagacji fali V<sub>S30</sub> przedstawionymi w tabeli 3.2.

Klasa gruntu	Opis stratygraficzny	<i>V</i> \$30, m/s
А	skały lub inne skalne formacje geologiczne z co najwyżej pięciometrową słabą warstwą przypowierzchniową	> 800
В	piaski, żwiry i twarde gliny, o co najmniej kilkunastometrowej miąższości, charakteryzujące się stopniowym wzrostem właściwości mechanicznych z głębokością	360-800
С	gęste lub średnio gęste piaski, żwiry lub twarde gliny o miąższości od kilkunastu do kilkuset metrów	180-360
D	utwory słabo lub średnio zwięzłe	< 180

W oparciu o model określony wzorami (3.31) i (3.32) z wykorzystaniem danych opisanych powyżej, została określona relacja tłumienia dla szczytowej wartości składowej poziomego wektora przyspieszenia drgań dla różnych klas gruntu (Chodacki, 2014)

$$\log(PGA_{H10}) = 0.223 \log(E) - 0.035r - \log r + S_i$$
(3.39)

gdzie:

 $PGA_{H10}$  – szczytowa wartość przyspieszenia drgań w paśmie do 10 Hz dla klasy gruntu A, B lub C,

E – energia wstrząsu,

r – odległość od źródła,  $r = \sqrt{r_e^2 + bh^2}$ .

Wartości parametru S opisującego klasę gruntu są następujące:

	А	В	С
S	0,586	0,667	0,721

Standardowy błąd estymacji dla modelu wyrażonego wzorem (3.39) wynosi  $S_e = 0,243$ , natomiast standardowe błędy oceny dla poszczególnych współczynników regresji (które są oszacowaniami współczynników regresji dla całej populacji) wynoszą:  $S_{\log(E)} = 0,024$ ,  $S_r = 0,006$ ,  $S_A = 0,186$ ,  $S_B = 0,173$ ,  $S_C = 0,170$ . Analogiczna relacja tłumienia do opisu szczytowych wartości składowych poziomych maksymalnego wektora prędkości drgań podłoża w GZW, dla wstrząsów o energii powyżej 5·10<sup>6</sup> J, w funkcji energii sejsmicznej i ich odległości hipocentralnej oraz klasy gruntów, przyjmuje następującą postać (Chodacki, 2016)

$$\log(PGV_H) = 0,209\log(E) - 0,035r - \log r + S_i$$
(3.40)

gdzie  $PGV_H$  jest szczytową wartością poziomej prędkości drgań dla trzech klas gruntu A, B i C [mm/s], która wynosi:

	А	В	С
S	-0,814	-0,659	-0,598

Analiza błędu wyznaczenia wartości  $log(PGV_H)$  przeprowadzona dla wzoru (3.40) wskazuje, że współczynnik determinacji wynosi  $R^2 = 0,86$ , czyli w 86% wyjaśnia zmienność danych pomiarowych, estymator błędu standardowego wynosi  $S_e = 0,314$ , natomiast standardowe błędy oceny dla poszczególnych współczynników regresji wynoszą:  $S_{log(E)} = 0,0298$ ,  $S_r = 0,0086$ ,  $S_A = 0,2283$ ,  $S_B = 0,2146$ ,  $S_C = 0,2097$ . Przykładowo dla wstrząsów o energii sejsmicznej rzędu  $10^8$  J i dla przedziału ufności 90%, przewidywane wartości  $log(PGV_H)$  mogą się różnić od średniej wartości nawet o 60% w strefie epicentralnej (rys. 3.2).

Jeżeli do obliczeń przyjmie się współczynnik dla klasy gruntów A, oznacza to obliczenia amplitud drgań dla podłoża skalnego, czyli jest to odpowiednik starszych wzorów regionalnych dla GZW opracowanych przez Mutke (1991).

Współczynnik amplifikacji drgań gruntu w obszarze GZW wykazuje dużą zmienność, co wpływa znacząco na obraz amplitud drgań. W związku z tym szczytowe wartości amplitud prędkości drgań powierzchni terenu  $PGV_{Hmax}$  wyznacza się za pomocą wzoru

$$PGV_{H\max} = PGV_{H(grA)}W_{amp}$$
(3.41)



**Rys. 3.2.** Prognozowane wartości  $PGV_H$  na różnych klasach gruntu dla mediany i dla 90% górnego przedziału ufności, dla wstrząsu sejsmicznego o energii  $E = 1 \cdot 10^9$  J – według wzoru (3.40)

gdzie  $PGV_{H(grA)}$  jest wartością szczytową poziomej prędkości drgań podłoża, wyliczoną dla gruntów klasy A według Eurokod 8

$$\log(PGV_{H(grA)}) = 0,209 \log(E) - 0,035r - \log(r) - 0,814$$
(3.42)

W obszarze GZW wzór (3.42) lepiej prognozuje szczytową wartość poziomej prędkości drgań podłoża skalnego niż wzór (3.37). Wzór (3.42) w bliskim polu zachowuje się zgodnie z obserwacjami, tzn. w obszarze epicentralnym krzywa regresji jest spłaszczona. Wzór (3.42) daje nieznacznie wyższe prognozy prędkości drgań w strefie epicentralnej w porównaniu ze wzorem (3.37). Analogicznie można wyznaczać szczytową wartość poziomego przyspieszenia drgań podłoża skalnego do 10 Hz w obszarze GZW według wzoru

$$\log(PGA_{H10(grA)}) = 0.223 \log(E) - 0.035r - \log(r) + 0.586$$
(3.43)

Chodacki (2013) opracował również wzory do wyznaczania czasu trwania drgań, co łącznie ze wzorami (3.39)–(3.43) pozwala na stosowanie ich do oceny intensywności i szkodliwości drgań w obszarze GZW z wykorzystaniem Górniczej Skali Intensywności Sejsmicznej GSIS-2017. Wzory na czasy trwania głównej fazy drgań zostały omówione w kolejnych rozdziałach monografii.

W GZW funkcjonuje duża liczba lokalnych relacji tłumienia, opracowanych głównie dla obszarów związanych z funkcjonowaniem poszczególnych kopalń węgla. Wykorzystywane są one do wyznaczania map izolinii amplitud i intensywności drgań po zaistnieniu silnego wstrząsu sejsmicznego (np. Mutke i Stec, 2008; Stec i Mutke, 2010; Golik i Mendecki, 2012; Bańka, 2014; Bańka, Koło-

dziejczyk i Lier, 2016; Mendecki, Duda i Idziak, 2018; Lurka, Gierlotka i Siata, 2019) oraz w formie ekspertyz. Lokalne relacje tłumienia w GZW wyznaczane są najczęściej według modelu liniowego Joynera i Boore'a (1981, 1988, 1993), z uwzględnieniem szacowania błędów na podstawie wyznaczonych przedziałów ufności dla określonego prawdopodobieństwa, np. p = 0,84 lub wartości regresji obliczonej jako kwantyl, np. rzędu 0,84 w funkcji odległości i energii sejsmicznej. Takie mapy informują o obszarach potencjalnie zagrożonych wpływami sejsmicznymi na powierzchni i pozwalają na sprawdzenie w wyznaczonym terenie stanu faktycznego tego zagrożenia. W GZW mapy opracowywane są z uwzględnieniem współczynnika amplifikacji drgań dla badanego obszaru, obliczonego dla lokalnych warunków budowy warstw nadkładu i charakterystyki częstotliwościowej głównej fazy drgań silnych wstrząsów sejsmicznych z tego obszaru (za silne wstrząsy uznaje się zjawiska sejsmiczne powyżej energii 10<sup>6</sup> J).

## Legnicko-Głogowski Okręg Miedziowy (LGOM)

W LGOM funkcjonuje wiele lokalnych i regionalnych relacji tłumienia [np. Lasocki i in., 2000; Speczik i in., 2003; Olszewska, 2008 (dla gminy Polkowice); Lasocki, 2013 (dla Żelaznego Mostu); Jaśkiewicz-Proć, Stolecki i Jaśkiewicz, 2016].

Przykładem regionalnej relacji tłumienia stosowanej w LGOM do oceny stopni intensywności drgań i zagrożenia sejsmicznego jest relacja opracowana w Cuprum (Jaśkiewicz-Proć, Stolecki i Jaśkiewicz, 2016). Do opracowania relacji wykorzystano rejestracje wstrząsów o energii od  $10^6$  do  $1,9\cdot10^9$  J z całego obszaru kopalń KGHM, zarejestrowanych przez 44 stacje sejsmometryczne; łącznie 1312 rejestracji najsilniejszych wstrząsów. Statystykę opracowano w oparciu model potęgowy, który po zlogarytmowaniu został doprowadzony do postaci liniowej, wykonano też regresję wieloraką szczytowej prędkości poziomej drgań  $PGH_{Hmax}$  i przyspieszenia poziomego drgań do 10 Hz  $PGA_{H10}$  w funkcji energii sejsmicznej *E*, odległości *r* i czasu trwania głównej fazy drgań  $t_{Hy}$ . Takie rozwiązanie pozwala na bezpośrednie stosowanie skali GSI-2004/18.

Otrzymano następującą postać relacji tłumienia dla szczytowych amplitud poziomej prędkości drgań (Jaśkiewicz-Proć, Stolecki i Jaśkiewicz, 2016)

$$PGV_{H\max} = 1,8599 E^{0,5386} \left( \sqrt{r_{epi}^2 + 900^2} \right)^{-0,8802} t_{H\nu}^{-0,5090}$$
(3.44)

gdzie szczytowa wartość składowej poziomej prędkości drgań jest obliczana według wzoru (2.13).

Współczynnik determinacji dla wzoru (3.44) wynosi 0,69, a błąd standardowy estymaty 0,2053, natomiast czas trwania, obliczany według wzoru (2.15), wyznaczany jest za pomocą relacji empirycznej

$$t_{H\nu} = 0.0542 E^{0.05555} r_{\rm epi}^{0.5052}$$
(3.45)

Relacja tłumienia dla szczytowych amplitud poziomego przyspieszenia drgań w paśmie do 10 Hz wynosi (Jaśkiewicz-Proć, Stolecki i Jaśkiewicz, 2016)

$$PGA_{H10} = 54,3125 \, E^{0,4769} \left( \sqrt{r_{\rm epi}^2 + 500^2} \right)^{-0,7158} t_{Ha}^{-0,8699} \tag{3.46}$$

gdzie szczytowa wartość składowej poziomej przyspieszenia drgań jest obliczana według wzoru (2.14).

Współczynnik determinacji dla wzoru (3.46) wynosi 0,74, a błąd standardowy estymaty 0,2003, natomiast czas trwania, obliczany według wzoru (2.15), wyznaczany jest za pomocą relacji empirycznej

$$t_{Ha} = 0.0573 E^{0.0365} r_{\rm epi}^{0.5067}$$
(3.47)

Relacje te są obecnie stosowane do oceny intensywności drgań według skali GSI-2004/18.

Poniżej podano przykład lokalnej relacji tłumienia w KGHM dla obszaru gminy Polkowice, opracowanej przez Olszewską (2008) dla składowych poziomych przyspieszenia i prędkości drgań w paśmie do 10 Hz. W obliczeniach uwzględnionych zostało 1327 rejestracji wstrząsów o energii sejsmicznej od  $10^6$  do  $1,9\cdot10^6$  J z 10 stacji sejsmometrycznych. Wstrząsy rejestrowano z odległości epicentralnej od 39 do 8492 m, a maksymalna zarejestrowana wartość przyspieszenia *PGA*<sub>H10</sub> wynosiła 2,47 m/s<sup>2</sup>, natomiast wyliczona prędkość drgań *PGV*<sub>H10</sub> – 9,9 cm/s. Relacja (3.48) pozwala dodatkowo na wyznaczanie względnej amplifikacji drgań pod dziewięcioma stacjami sejsmometrycznymi w odniesieniu do stacji referencyjnej, co znacznie podnosi wartość użyteczną opracowanych wzorów.

Do oszacowania relacji tłumienia szczytowej wartości składowej poziomej przyspieszenia w paśmie do 10 Hz wykorzystany został model stosowany przez Joynera i Boore'a (1981, 1988, 1993), a relacja dla obszaru miasta Polkowice jest następująca (Olszewska, 2008)

$$\log(PGA_{H10}) = 0.337 \log(E) - 1.112 \log\sqrt[2]{(r^2 + 450^2)} + \delta k$$
(3.48)

gdzie  $\delta k$  jest wartością wyrazu wolnego dla określonego stanowiska sejsmometrycznego.

Dla stanowiska referencyjnego ze względną amplifikacją W = 1, wyraz wolny przyjmuje wartość  $\delta k = 0,177$ , a dla stanowiska o największej amplifikacji  $\delta k = 0,293$ . Dla innych stanowisk wyrazy wolne podane są w rozprawie doktorskiej Olszewskiej (2008). *PGA*<sub>H10</sub> obliczane jest w m/s<sup>2</sup>.

Współczynnik determinacji dla wzoru (3.48) wynosi 0,71, a błąd standardowy estymaty 0,184.

Wyznaczono też wzór na prognozę szczytowej wartości składowej poziomej prędkości drgań do 10 Hz. Współczynnik determinacji wyniósł 0,719, a błąd standardowy estymaty 0,183 (Olszewska, 2008)

$$\log(PGV_{H10}) = 0,408\log(E) - 1,063\log^2\sqrt{(r^2 + 520^2)} + \delta k$$
(3.49)

gdzie  $\delta k$  jest wartością wyrazu wolnego dla określonego stanowiska sejsmometrycznego.

Dla stanowiska referencyjnego ze względną amplifikacją W = 1, wyraz wolny przyjmuje wartość  $\delta k = -0,048$ , a dla stanowiska o największej amplifikacji  $\delta k = 0,172$ .  $PGV_{H10}$  obliczane jest w cm/s<sup>2</sup>.

Współczynnik determinacji dla wzoru (3.49) wynosi 0,719, a błąd standardowy estymaty 0,183.

Obliczone przedziały ufności dla wzorów (3.48) i (3.49) można znaleźć w rozprawie doktorskiej Olszewskiej (2008).

Przy opracowywaniu map drgań sejsmicznych (ang. *shaking maps*) należy zwrócić uwagę, czy lokalizacja stacji sejsmicznych, na podstawie których wyznacza się relacje tłumienia, jest reprezentatywna dla badanego obszaru pod względem budowy warstw nadkładu. Jeżeli lokalizacja czujników drgań nie pokrywa pełnej litologicznej różnorodności warstw nadkładu, to mapy drgań analizowanego obszaru, wykreślane na podstawie opracowanych relacji tłumienia, nie będą wiarygodnie odzwierciedlać prognozowanych drgań gruntu, nawet jeżeli w obliczeniach uwzględni się wyznaczenie względnej amplifikacji pod stacjami sejsmicznymi. W takim przypadku należałoby wyznaczyć mapę amplifikacji drgań analizowanego obszaru i uwzględnić ją w ostatecznym rozkładzie izolinii drgań gruntu.

Lasocki (2013) opracował relacje tłumienia dla ważnego obszaru, na którym zlokalizowany jest obiekt hydrotechniczny Żelazny Most. W rozwiązaniu został uwzględniony względny współczynnik amplifikacji drgań pod stacjami sejsmometrycznymi.

## Lubelskie Zagłębie Węglowe (LZW)

W miarę rozwoju sieci monitoringowej w zagłębiach górniczych przybywa danych pomiarowych i wzory są modernizowane. W LZW od roku 2015 rozpoczęto rejestrację wstrząsów indukowanych prowadzoną tam eksploatacją górniczą, z wykorzystaniem aparatury AMAX-GSI. Ze względu na zbyt małą bazę wstrząsów nie opracowano jeszcze relacji tłumienia dla obszaru LZW.

# Bełchatowskie Zagłębie Węgla Brunatnego (BZWB)

Silne wstrząsy górnicze obserwuje się również od początku budowy kopalni węgla brunatnego Bełchatów. Pierwszy bardzo silny wstrząs zarejestrowano już w roku 1979 (magnituda określona przez stację sejsmiczną Instytutu Geofizyki PAN wyniosła M = 3,6). Ostatni silny wstrząs miał miejsce w roku 2014 i charakteryzował się energią sejsmiczną  $E = 1,6 \cdot 10^{10}$  J (magnituda lokalna M = 4,42). Od prawie 40 lat wstrząsy sejsmiczne, które wystąpiły na tym obszarze, są monitorowane przez lokalną kopalnianą sieć sejsmologiczną. Silne wstrząsy, powodujące lekkie uszkodzenia budynków w strefie epicentralnej, występują rzadko, co kilka, kilkanaście lat. Istniejący zbiór danych nie pozwalał dotychczas na opracowywanie zadowalających lokalnych relacji tłumienia. W ostatnich latach sieć jest jednak modernizowana i rozbudowywana, co z pewnością pozwoli na opracowanie lokalnych relacji tłumienia dla BZWB. Obecnie mapy izolinii drgań gruntu (przyspieszenia i prędkości) wyznaczane są przez inwersję wzoru na obliczanie energii wstrząsów (energia sejsmiczna jest proporcjonalna do kwadratu prędkości drgań gruntu) i uwzględnianie mapy amplifikacji drgań wyznaczonej dla charakterystycznych częstotliwości głównej fazy drgań z największymi amplitudami (Mutke i in., 2019b).

# 3.2.2.3. Prognozowanie drgań rotacyjnych w polskich zagłębiach górniczych

Nowością są relacje tłumienia dla drgań rotacyjnych. Takie drgania mogą być niepożądane i szkodliwe dla pewnych typów obiektów budowlanych, np. bardzo wysokich kominów, budynków lub długich mostów itp. (Bońkowski, Zembaty i Minch, 2018), nawet jeśli są to prędkości obrotowe rzędu miliradia-nów na sekundę. W obszarze GZW pomiary drgań rotacyjnych wykonywane są w kilku miejscach za pomocą czujników elektrochemicznych R-1, mierzących prędkość obrotową wokół trzech prostopadłych osi. W inżynierii sejsmicznej obroty wokół osi poziomych X i Y zwane są *rocking*, natomiast wokół osi pionowej Z – *torsion* i opisywane w jednostkach mrad/s. Dodatkowo w każdym punkcie zainstalowane zostały trójskładowe akcelerometry EA-120 (pomiary

wykonane w ramach pracy statutowej Głównego Instytutu Górnictwa pt. *Monitorowanie i badanie efektów rotacyjnych zjawisk sejsmicznych indukowanych przez eksploatację górniczą w GZW*, realizowanej przez Mutke i innych (2016) – dostęp do katalogu na stronie internetowej GRSS GIG (www.grss.gig.eu). Pierwsze wyniki i interpretacje danych pomiarowych zostały przedstawione w literaturze (Mutke, Zembaty i Nawrocki, 2017; Zembaty i in., 2017a, 2017b). Istotną informacją wynikającą z pomiarów drgań rotacyjnych (ang. *Peak Rotational Velocity*, PRV) i translacyjnych (ang. *Peak Ground Acceleration*, PGA) jest empiryczne potwierdzenie ich liniowej zależności dla wartości szczytowych. Zależność taką dla danych ze stanowiska w Imielinie przedstawia rysunek 3.3.



**Rys. 3.3.** Zależność drgań rotacyjnych wokół osi pionowej *Z* – *PRVz* [mrad/s] od drgań translacyjnych; szczytowe przyspieszenie w płaszczyźnie poziomej *PGA*<sub>H</sub> [m/s<sup>2</sup>] (Zembaty i in., 2017b)

Analiza rysunku 3.3 w sposób empiryczny potwierdza opis matematyczny [wzór (2.29)] widocznej korelacji liniowej między prędkością kątową drgań gruntu wokół osi pionowej, a odpowiednim wektorem pochodnej po czasie przemieszczenia drgań gruntu, dla zjawisk sejsmicznych indukowanych eksploatacją górniczą. To z kolei pozwala na wyciągnięcie wniosku, że drgania rotacyjne dla wstrząsów sejsmicznych indukowanych eksploatacją pokładów węgla w GZW, mogą być opisane podobną relacją tłumienia jak dla drgań translacyjnych. Wnioskowanie to okazało się słuszne i po raz pierwszy relacje między maksymalną prędkością kątową drgań *RVPE* (ang. *rotational velocity prediction equation*), a magnitudą i odległością hipocentralną *r*, opracowano dla wstrząsów indukowanych eksploatacją węgla w GZW. Przykładowo dla prędkości obrotów wokół osi poziomej *PRV<sub>H</sub>* relacja skalowania *RVPE* przyjmuje postać (Mutke i in., 2018a)

55

 $\log PRV_H = -2,335 + 0,847M - \log r - 0,00012r + 0,218P$ (3.50)

gdzie:

 $PRV_{H} = \frac{\max}{t} \sqrt{RV_{EW}^{2}(t) + RV_{NS}^{2}(t)}$ , przy czym  $RV_{EW}$  – maksymalna prędkość rotacji wokół osi NS; r =  $(d^{2} + h^{2})^{1/2}$  [m], przy czym d – odległość od epicentrum [m], h – średnia głębokość górniczych wstrząsów sejsmicznych [m], które minimalizują sumę kwadratów odchyłek między wartościami pomierzonymi i estymowanymi; rozwiązanie uwzględnia jako istotne zarówno rozpraszanie geometryczne, jak i pochłanianie fal.

Współczynnik determinacji wynosi  $R^2 = 0,669$  (wyjaśnia prawie 67% danych), a błąd standardowy estymaty SSE = 0,218. Współczynnik P = 0 dla kwantyla 0,5 i P = 1 dla kwantyla 0,84 (kwantyl rzędu 0,84 oznacza, że 84% wartości prognozowanych znajduje się poniżej krzywej regresji dla tego kwantyla).

# 3.2.3. Amplifikacja drgań

Warstwy nadkładu są finalnym czynnikiem warunkującym efekt sejsmiczny drgań powierzchni, po sile wstrząsu sejsmicznego, tłumieniu fal na drodze od źródła do miejsca obserwacji oraz kierunkowości drgań wynikającej z mechanizmu wstrząsu sejsmicznego. W zależności od swojej charakterystyki sejsmogeologicznej nadkład wpływa w różny sposób na zmianę amplitudy drgań oraz podstawowej częstotliwości i czasu trwania drgań (Lomnitz i Rosenblueth, 1976). Liczne pomiary empiryczne wykonywane dla trzęsień ziemi i wstrząsów indukowanych eksploatacją górniczą wskazują, że nadkład zbudowany ze słabych gruntów (niska prędkość propagacji fali poprzecznej S – poniżej 800 m/s) wzmacnia amplitudy drgań, obniża podstawową częstotliwość i zwiększa czas trwania drgań (tzw. zjawisko amplifikacji). Z kolei twarde skalne podłoże nie wzmacnia amplitudy drgań i preferuje wyższe częstotliwości i krótszy czas drgań. Te różne charakterystyki drgań wywoływane przypowierzchniowymi warstwami nadkładu, mogą w przypadku gruntów słabych istotnie wpływać na intensywność sejsmiczną i na wielkość sił dynamicznych w budynku. Większe siły dynamiczne działające na budynek powodują z kolei jego większe uszkodzenia, np. podczas trzęsienia ziemi w Meksyku w roku 1985. Trzęsienie wywołało rezonans w miękkich warstwach pojeziornych w centrum miasta Meksyk i spowodowało śmierć około 10 000 osób, zniszczyło także wysokie 5-15--piętrowe budynki w śródmieściu (zwiększone zostały amplitudy drgań w tej

części miasta nawet do 12 razy, a częstotliwości zbiegły się z okresem drgań własnych wysokich budynków – Elnashai i Di Sarno, 2008).

Oszacowanie amplifikacji drgań w odniesieniu do różnych warunków budowy warstw nadkładu jest nazywane mikrorejonizacją (ang. microzonation) i stanowi istotny element przy opracowywaniu map zagrożenia sejsmicznego (ang. seismic hazard maps). Już od dawna było wiadome, że zniszczenia i uszkodzenia budowli podczas trzęsień ziemi wykazują związek z lokalną budową geologiczną. Przykładem może być trzęsienie ziemi w Kanto w Japonii w roku 1923. Obserwowano wówczas znaczne różnice w zniszczeniach i intensywności drgań w Tokio, większe na młodszych aluwialnych osadach z epoki holoceńskiej po stronie wschodniej miasta, mniejsze na starszych dyluwialnych osadach z epoki plejstoceńskiej (Kokusho, 2017). Przy opracowywaniu stref zagrożenia sejsmicznego amplifikacja powinna być wyznaczana dla warstw nadkładu położonych nad twardym podłożem, definiowanym przez prędkość propagacji fali poprzecznej  $V \ge 800$  m/s. Należy mieć świadomość, że wiarygodność wyznaczenia amplifikacji drgań zależy w głównej mierze od znajomości miąższości i charakterystyki warstw nadkładu. W przypadku wyznaczania współczynnika amplifikacji pod konkretnie zlokalizowany projekt obiektu budowlanego, możliwe jest korzystanie z dokładnych pomiarów sejsmicznych. Profilowania sejsmiczne dają precyzyjną informację o miąższości warstw nadkładu i prędkości propagacji w nich fal poprzecznych, czyli podstawowych parametrach do obliczania współczynnika amplifikacji. Ostatnio bardzo popularne w świecie są pomiary sejsmiczne z użyciem techniki MASW (Park, Xia i Miller, 1999; Siata i Chodacki, 2005). Stosuje się też technikę współczynnika spektralnego H/V obliczanego dla mikrowstrząsów (Nakamura, 1989). W przypadku tworzenia mapy rozkładu współczynnika amplifikacji drgań w większym obszarze, izolinie będą aproksymowane z punktów, dla których taka informacja jest znana.

W przypadku amplifikacji drgań można mieć do czynienia z amplifikacją fal bezpośrednich (*P* i *S*) i fal powierzchniowych. Z tych fal najistotniejszą rolę z punktu widzenia amplifikacji w poziomym warstwowanym ośrodku i z punktu widzenia zastosowań geotechnicznych odgrywają fale *SH*. Pozostałe rodzaje fal wywołują istotny efekt w bardziej jednorodnym ośrodku lub w skomplikowanych warunkach tektonicznych. Z fizycznego punktu widzenia amplifikacja fal *SH* w ośrodku warstwowym polega na zjawisku wielokrotnego odbicia i nakładania się fal padających i odbitych (Okamoto, 1984).

W pomiarach (weryfikacja obliczeń) stosuje się dwa systemy obserwacji amplifikacji drgań (rys. 3.4). Pierwszy system poziomej sieci sejsmicznej to system z czujnikami rozlokowanymi na powierzchni w bliskiej odległości na twardej skale Bs i na nadkładzie gruntów miękkich As (Kokusho, 2017). Przyjmuje się, że A2 to fala padająca na twardą skałę, a A1 to fala padająca na miękki nadkład. Po zarejestrowaniu zbioru trzesień ziemi porównuje sie stosunek amplitud drgań powierzchniowych na miękkim nadkładzie As i na twardej skale Bs. Amplifikacja sejsmiczna w takich pomiarach wyrażona jest jako współczynnik  $H1(\omega) = 2A1/2A2$  lub  $H1(\omega) = A1/A2$  i nazywana bezpośrednim wzmocnieniem fali padającej (ang. incident wave amplification). W drugim systemie amplitudy drgań rejestrowane są z użyciem pionowych sieci sejsmologicznych, na miękkim nadkładzie na powierzchni w punkcie As i na twardej skale w otworze wiertniczym w punkcie B położonym pod punktem As. Na powierzchni w punkcie A amplitudy drgań wynosza 2A1, a amplifikacja  $H2(\omega) = 2A1/(A2 + B2)$ , gdzie B2 to fala odbita od powierzchni, propagująca w dół w podłożu skalnym. Rejestracja w punkcie B jest zatem rejestracją złożoną z nałożenia się fali padającej A2 (skierowanej do góry) i fali B2 (skierowanej w dół). Amplifikacja H2( $\omega$ ) jest nazywana wzmocnieniem fali złożonej (ang. composite wave amplification) (Kokusho, 2017).



**Rys. 3.4.** Dwa systemy obserwacji sejsmicznej zjawiska amplifikacji drgań przez nadkład warstw miękkich (As, Bs to stacje sejsmiczne na powierzchni, natomiast B to stacja z czujnikiem zlokalizowanym w otworze wiertniczym na głębokości sztywnych warstw skalnych) (opracowano na podstawie Kokusho, 2017)

W praktycznych zastosowaniach bardziej użyteczny jest współczynnik amplifikacji H1( $\omega$ ) (Mutke, 1991).

## 3.2.3.1. Podstawy teoretyczne amplifikacji drgań dla modelu dwuwarstwowego

W praktyce występuje najczęściej wielowarstwowy ośrodek miękkich warstw nadkładu, przykrywający twarde podłoże skalne. Taki układ warstw w obliczeniach amplifikacji drgań najczęściej upraszczany jest do modelu

dwuwarstwowego, w którym warstwa nadkładu stanowi jedną sumaryczną miąższość *H*, składającą się z kilku cieńszych. Dwuwarstwowy model z powodzeniem jest stosowany w badaniach inżynierskich służących do obliczania odpowiedzi dynamicznej warstw nadkładu (Kokusho, 2017). Przez twarde podłoże skalne rozumie się skały, w których fala poprzeczna propaguje z prędkością  $\beta \ge 800$  m/s. Przez nadkład warstw miękkich rozumie się warstwy, w których fala poprzeczna propaguje z prędkością  $\beta < 800$  m/s.

Przedstawione poniżej procedury obliczeniowe odnoszą się do fal poprzecznych *SH* i pionowo padających fal podłużnych *P*, i są oparte na rozwiązaniu przedstawionym w publikacji Sawarienskiego (1959). Takie drgania występują szczególnie często przy górniczych wstrząsach sejsmicznych występujących 2–3 km od epicentrum, czyli w strefie, w której zwykle obserwuje się uszkodzenia budynków po najsilniejszych wstrząsach.

Przesłanki pomiarowe i rozwiązania teoretyczne przejścia fali sejsmicznej przez górotwór wielowarstwowy wykazują zmianę amplitud drgań przy przechodzeniu fali przez poszczególne warstwy. Ogólnie można powiedzieć, że wpływ na zmianę amplitudy drgań mają następujące czynniki:

- długość fali padającej  $\lambda$  (lub jej prędkość kątowa  $\omega = 2\pi f$ ),
- miąższość warstwy *H*,
- gęstość warstwy ρ,
- prędkość fali poprzecznej w warstwie nadkładu β,
- typ fali (SH, V),
- kąt padania fali e.

Dane pomiarowe wykazują, że w zależności od budowy warstw przypowierzchniowych szczytowe wartości przyspieszeń drgań powierzchni terenu od wstrząsów górniczych mogą ulegać zarówno częściowemu wytłumieniu, jak i wzmocnieniu. W takim ujęciu szczytowe wartości amplitud prędkości drgań powierzchni terenu wyznacza się za pomocą wzoru (3.38), tj. mnożąc amplitudę drgań twardego podłoża przez amplifikację drgań  $W_{amp}$ .

Dla obliczenia współczynnika amplifikacji istotna jest znajomość dominujących częstotliwości drgań (częstości kołowej) dochodzących do amplifikujących warstw nadkładu. Największe wartości prędkości *PGV* i przyspieszeń *PGA* drgań w GZW są związane z falami bezpośrednimi. W szczególności odnoszą się one do fal poprzecznych spolaryzowanych poziomo, czyli fal *SH*. Fala ta, przy przechodzeniu przez poziome granice, nie tworzy innych typów fal.

Algorytm obliczeniowy współczynnika podłoża oparto na rozwiązaniu modelu ośrodka sprężystego z tłumieniem – model Kelvina. Dla padających na

powierzchnię ziemi pod dowolnym kątem *e* fal *SH* i pionowo padających fal podłużnych *P*, amplituda drgań ulega podwojeniu (wynika to z warunków brzegowych, jakie fala napotyka na granicy warstwa-powietrze). Jeśli fale te propagują przez płaską poziomą granicę rozdziału warstw (z = 0), to częściowo ulegają one odbiciu, a częściowo załamaniu. Prędkość propagacji fal podłużnych i poprzecznych oraz gęstość oznaczane są odpowiednio  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\rho$ . Indeks 0 odpowiada niższej warstwie (najczęściej skalnej, z > 0), a indeks 1 – górnej warstwie nadkładu (z < 0).



**Rys. 3.5.** Przyjęty model obliczeniowy współczynnika amplifikacji drgań; odbicie fal poprzecznych (a) i podłużnych (b) (Sawarienskij, 1959)

Przyjmuje się, że prędkości propagacji fal w warstwie przypowierzchniowej są mniejsze niż w podłożu skalnym. Amplitudy fal padających na granicę, dla porównania z innymi falami, są przyjmowane jako 1. Odbicie fal od granicy warstw opisywane jest współczynnikiem  $k_0$ , a załamanie współczynnikiem  $k_1$ . Współczynniki  $k_0$  i  $k_1$  wynikają z warunku ciągłości przemieszczeń i naprężeń na granicy z = 0 (Sawarienskij, 1959)

$$k_0 = (1 - m_1/m_0) / (1 + m_1/m_0), k_1 = 2 / (1 + m_1/m_0)$$
(3.51)

gdzie:

 $m_0 = \alpha_0 \rho_0$ ,  $m_1 = \alpha_1 \rho_1$ , przy czym:  $\alpha_0$  – prędkość fali podłużnej w podłożu skalnym,  $\alpha_1$  – prędkość fali podłużnej w nadkładzie,  $\rho_0$  – gęstość skał podłoża,  $\rho_1$  – gęstość skał nadkładu.

Powyższe formuły dotyczą fal *P* padających pionowo i dowolnie padających fal *SH*:

dla fal P	$m = \alpha \rho$	(3.52)
dla fal <i>SH</i>	$m = \beta \rho \sin e$	(3.53)

Rozwiązania analityczne w przypadku fal *SH* i fal *P* padających pionowo jest analogiczne. Poniżej przedstawiono dla fal podłużnych. Ocenie poddano wpływ warstwy o grubości *H*, leżącej na półprzestrzeni, na zmianę amplitudy drgań. Oprócz odbicia fali od spodu warstwy, następuje również odbicie fal od powierzchni swobodnej. Fale te powracają do spodu warstwy, częściowo załamując się, a częściowo ulegają odbiciu i wracają w kierunku powierzchni ziemi, gdzie następuje interferencja: fale padające na powierzchnię ziemi w fazie będą wzmacniane, a w przeciwfazie będą się wzajemnie osłabiać (tłumić) (rys. 3.6).



**Rys. 3.6.** Przyjęty model obliczeniowy współczynnika amplifikacji drgań dla fal padających pionowo w warstwie o miąższości *H* (Sawarienskij, 1959)

Tłumienie fal w czasie ich propagacji w środowisku zwykle znacznie osłabia wpływ odbić wielokrotnych. Do obliczeń przyjęto koncepcję fal płaskich. Jest to rozwiązanie równania falowego, w którym przemieszczenia występują tylko na kierunku propagacji fali, natomiast w kierunku prostopadłym przyjmowane są jako stałe. Przykładowo dla propagacji fali w płaszczyźnie wzdłuż *x*, przemieszczenia można zapisać

$$\mathbf{u}(x,t) = \mathbf{f}\left(t \pm \frac{x}{\alpha}\right) \tag{3.54}$$

gdzie **f** jest funkcją wektorową, a fale propagują zarówno w kierunku +x, jak i przeciwnym –x.

Jeżeli zależność od czasu zastąpi się zależnością od częstotliwości, to amplituda przemieszczenia dla określonej częstości kątowej  $\omega$  może być wyrażona równaniem (Shearer, 2009)

$$\mathbf{u}(x,t) = \mathbf{A}(\omega) \mathrm{e}^{-i(\omega t - kx)}$$
(3.55)

gdzie  $k = \omega/\alpha$ .

Zgodnie z rysunkiem 3.6 fala podłużna, biegnąca do powierzchni ze skalnej półprzestrzeni (oś *z* skierowana w dół), charakteryzuje się przemieszczeniem

$$W = e^{i\omega(t - z/\alpha_0)}$$
(3.56)

gdzie  $\omega = 2\pi f;$ 

przy granicy warstwy *z* = 0, fala ta częściowo się odbija, a częściowo załamuje. W wyniku tych procesów w półprzestrzeni powstaje system fal

$$W_0 = e^{i\omega(t + z/\alpha_0)} + k_0 e^{i\omega(t - z/\alpha_0)}$$
(3.57)

gdzie  $k_0$  jest współczynnikiem odbicia, a drugi człon równania opisuje falę odbitą.

W warstwie  $0 \le z \le -H$ , tworzą się fale

$$W_1 = k_1 e^{i\omega(t + \kappa_z/\alpha_1)} - k_{11} e^{i\omega(t - \kappa_z/\alpha_1)}$$
(3.58)

Pierwsze wyrażenie w (3.58) opisuje falę przechodzącą do nadkładu (lub falę załamaną *SH*), drugi człon – falę odbitą od powierzchni ziemi.

Dla dalszych obliczeń istotny jest wynik uzyskany na powierzchni ziemi (z = -H), co sprowadza się do określenia  $k_1$  i  $k_{11}$  oraz wykluczenia  $k_0$ . Dla zrealizowania tego celu korzysta się z trzech warunków brzegowych, tzn. z warunku ciągłości przemieszczeń i naprężeń na granicy z = 0 i braku naprężeń dla z = -H(powierzchnia ziemi). Otrzymuje się (Sawarienskij, 1959):

$$1 + k_0 = k_1 + k_{11} \tag{3.59}$$

$$1 - k_0 = [(m_1/m_0)\kappa + c]k_1 - [(m_1/m_0)\kappa - c]k_{11}$$
(3.60)

$$k_1(m_1\kappa + c)e^{-i\kappa b} - k_{11}(m_1\kappa - c)e^{i\kappa b} = 0$$
(3.61)

gdzie:

 $m_1 = \alpha_1 \rho_1; m_0 = \alpha_0 \rho_0,$ 

 $\kappa = \kappa_1 - i\kappa_2$ , przy czym  $\kappa_2$  jest tłumieniem amplitudy, a  $\kappa_1$  składnikiem określającym dyspersję,

 $b = \omega H/\alpha_1$ , przy czym *H* jest miąższością warstwy nadkładu.

Wielkość amplitudy na powierzchni warstw nadkładu wynosi (Sawarienskij, 1959)

$$W_1 = (2m_1\kappa)/(A\cos\kappa b + iB\sin\kappa b)$$
(3.62)

gdzie A i B są współczynnikami zespolonymi.

Po dalszych przekształceniach otrzymuje się

$$W_{1} = \frac{2}{\cos(b)[\cosh(\kappa_{2}b) + \frac{m_{1}}{m_{2}}\sinh(\kappa_{2}b)] + \kappa_{2}\frac{m_{1}}{m_{0}}\sin(b)\cosh(\kappa_{2}b) + \frac{2}{1 + i[\sin(b)[\sinh(\kappa_{2}b) + \frac{m_{1}}{m_{2}}\cosh(\kappa_{2}b)] - \kappa_{2}\frac{m_{1}}{m_{0}}\cos(b)\sinh(\kappa_{2}b)}$$
(3.63)

Równanie (3.63) umożliwia wyznaczanie współczynnika amplifikacji drgań  $W_{f}$ , przy znajomości takich parametrów, jak:  $m_0$ ,  $m_1$ ,  $\alpha_{0,1}$ ,  $\kappa_{1,2}$ , b i H. Z równania tego wynika również możliwość osłabienia amplitudy drgań po przejściu fali przez warstwę nadkładu, co często obserwowane jest w praktyce.

Wszystkie opisane równania są prawdziwe, również dla fali poprzecznej *SH* padającej pod dowolnym kątem  $e_0$ , w kierunku spągu warstwy. Dla fali *SH* należy uwzględnić (Sawarienskij, 1959)

$$m_1 = b_1 \rho_1 \sin e_1, m_0 = b_0 \rho_0 \sin e_0, b = 2\pi (H/\lambda) \sin e_1$$
(3.64)

gdzie:

- $\lambda$  długość fali ( $\lambda$  =  $\beta/f),$  przy czym $\beta$ jest prędkością propagacji fali poprzecznej,
- H miąższość nadkładu.

Z rozwiązania analitycznego amplifikacji drgań dla systemu sieci sejsmometrycznej w poziomie (rys. 3.5) i rejestracji na stanowisku Bs (posadowienie na powierzchni na skale) i na stanowisku As (posadowienie na warstwie miękkiego nadkładu) oraz rozwiązania analitycznego, wyniku amplifikacji dla systemu sieci sejsmometrycznej w pionie (rys. 3.5) i rejestracji na stanowisku B (posadowienie czujnika w skale w otworze wiertniczym) oraz na stanowisku As, wynika, że:

- Obliczona amplifikacja jest identyczna dla obu systemów rejestracji, kiedy sztywność warstwy podłoża skalnego dąży do nieskończoności,  $\rho_0\beta_0 \rightarrow \infty$ .
- Jeżeli  $\rho_0\beta_0$  jest względnie małe, amplifikacja obliczona dla sytemu pomiarowego pionowego (H2( $\omega$ ) = 2A1/(A2 + B2), w stosunku do amplifikacji policzonej dla systemu stacji sejsmicznych rozlokowanych na powierzchni w poziomie (H1( $\omega$ ) = 2A1/2A2), będzie zdecydowanie większa. W szczególności będzie to dotyczyć słabych trzęsień ziemi lub wstrząsów górniczych.

Rozwiązanie przedstawione powyżej dotyczy ośrodka składającego się z układu dwóch warstw poziomych i fali poprzecznej padającej pionowo na granicę warstw.

Do bardzo ważnych wniosków odnoszących się do amplifikacji i przydatnych w codziennej praktyce inżynierskiej należy zaliczyć następujące:

- 1. Amplitudy drgań padających na swobodną powierzchnię ziemi ulegają podwojeniu; na powierzchniowym stanowisku sejsmometrycznym rejestruje się więc dwa razy większe amplitudy niż dochodzące do granicy gruntu z powietrzem.
- 2. Dla fali sejsmicznej o okresie drgań  $T = 4H/\beta$  amplifikacja będzie największa.

Inaczej wyrażając zależność przedstawioną w pkt. 2, otrzymuje się podstawowy okres pierwszego rezonansu warstwy nadkładu

$$f_{\rm rez1} = \frac{\beta}{4H} \tag{3.65}$$

gdzie  $f_{rez1}$  jest podstawową częstotliwością pierwszego rezonansu drgań warstwy nadkładu; dla podstawowej częstotliwości rezonansu amplifikacja (wzmocnienie) drgań będzie największa.

Badania dowodzą (Kokusho, 2017), że ośrodek wielowarstwowy można zastąpić modelem dwuwarstwowym. Formuła ¼ długości fali będzie w dalszym ciągu obowiązywała dla takich warunków przy modyfikacji zapisu wzoru (3.65). Wówczas otrzyma się aproksymację rozwiązania dokładnego

$$f_{\rm rez1} = \frac{1}{T} = \frac{1}{4\sum_{i} H_i / \beta_i}$$
(3.66)

gdzie  $H_i/\beta_i$  jest czasem przejścia fali *SH* w ośrodku o *i*-warstwach o miąższości  $H_i$  i prędkości fali poprzecznej  $\beta_i$ ; równanie (3.66) można również zapisać jako (Kokusho, 2017)

$$f_{\rm rez1} = \frac{\beta_{\rm sr}}{4H} \tag{3.67}$$

gdzie  $\beta_{\rm sr} = \frac{H}{\sum_i H_i / \beta_i}$ .

Rozwiązanie amplifikacji drgań można przedstawić ponadto dokładnie dla ośrodka wielowarstwowego opisanego modelem lepko-sprężystym (Okamoto, 1984; Marcak i Zuberek, 1994). Równość naprężeń i odkształceń na granicach warstw prowadzi do związków między amplitudami drgań w kolejnych warstwach i określenia funkcji przejścia, będącej stosunkiem amplitudy drgań, która pojawi się na powierzchni ziemi, do amplitudy takiego drgania, jakie pojawiłoby się w skałach podłoża. Przykładem ogólnodostępnego programu komputerowego służącego do obliczania amplifikacji drgań dla modelu wielo-

warstwowego jest program SHAKE. Do przedstawionego w tym rozdziale algorytmu ośrodka dwuwarstwowego w roku 1991 opracowano w GIG program o nazwie WARSTWY-AMP. Program ten wyznacza wartość współczynnika amplifikacji drgań w miejscu, dla którego znane są następujące parametry sejsmogeologiczne ośrodka:

- miąższość warstwy,
- prędkość propagacji fali w strefie małych prędkości i w podłożu twardym (najlepiej rozpoznana w terenie za pomocą pomiarów sejsmicznych),
- gęstość ośrodka w strefie małych prędkości i w podłożu skalnym,
- częstotliwość (długość) fali padającej z twardego podłoża na warstwę nadkładu.

Dane geologiczne dotyczące miąższości warstwy o małej prędkości propagacji fal sejsmicznych odczytuje się z map nadkładu czwartorzędowego bądź bezpośrednio z wyników profilowania sejsmicznego.

Gęstość ośrodka oznaczana jest w laboratorium na próbkach rdzeni otworowych lub przypisywana z literatury dla określonej budowy litologicznej nadkładu i podłoża twardego.

Częstotliwość drgań określa się na podstawie informacji uzyskanych z pomiarów drgań indukowanych wstrząsami górniczymi zarejestrowanych na podłożu skalnym. Dla obszaru Górnego Śląska takie pomiary i zależności empiryczne zostały przedstawione w pracy doktorskiej Mutke (1991).

Prędkość propagacji fal sejsmicznych wyznacza się z profilowań sejsmicznych, a gdy takich brak, parametry te szacowane są na podstawie danych literaturowych dla znanego profilu litologicznego. Są one jednak zdecydowanie mniej dokładne niż wyznaczone z pomiarów sejsmicznych. W Eurokod 8 wskazuje się na potrzebę klasyfikacji podłoża w oparciu o pomiary prędkości propagacji fal sejsmicznych, na głębokość do 30 m, jednak należy pamiętać, że do obliczeń amplifikacji lepiej jest stosować prędkość propagacji warstwy do głębokości twardego podłoża, czyli gdy osiągnie się  $\beta > 800$  m/s.

# 3.2.3.2. Wyznaczanie dynamicznej odpowiedzi warstw przypowierzchniowych z wykorzystaniem metody spektrum *H/V* obliczanego z mikrodrgań

Mikrodrgania to szumy wywołane naturalnymi zjawiskami, np. fale oceaniczne czy wiatr, lub zjawiskami antropogenicznymi, np. ruch pojazdów, praca maszyn. Już w roku 1954 Kanai i Tanaka (za Kokusho, 2017) prowadzili badania właściwości mikrodrgań w celu zbadania dynamicznej odpowiedzi warstw nadkładu. Jednym z podstawowych celów tych badań było określenie głównej częstotliwości drgań warstw nadkładu. W kolejnych latach badano stosunek spektrów od drgań rejestrowanych na podłożu skalnym i na miękkim nadkładzie w celu określenia amplifikacji drgań fal *SH*. Metoda nie zdawała egzaminu, ponieważ na mikrodrgania składają się głównie fale powierzchniowe Rayleigha. Nagoshi i Igarashi (za Kokusho, 2017) zbadali, że dla fal Rayleigha stosunek spektrum od drgań poziomych do drgań pionowych *H/V* może być całkiem dobrą oceną amplifikacji drgań przez nadkład w miejscu pomiaru.

Nakamura (1989, 2000) zastosował pomiary mikrodrgań i spektrum H/Vdo oceny amplifikacji drgań odpowiadającej tej wyznaczanej z teorii wielokrotnych odbić fali. Wykorzystanie poziomej i pionowej składowej drgań w danym punkcie w trakcie dalszej analizy polega na obliczeniu w odpowiedni sposób widm z tych składowych i podzieleniu ich przez siebie. W wyniku tego otrzymuje się podzielone amplitudowe spektrum fourierowskie, na którym maksymalna wartość reprezentuje wielkość amplifikacji drgań warstwy, a odpowiadająca jej częstotliwość jest interpretowana jako częstotliwość drgań własnych. Wynika stąd, że dla warstw silnie wzmacniających drgania sejsmiczne, a więc warstw bardzo miękkich o małej prędkości propagacji fali poprzecznej, powinno się obserwować wyraźne jedno maksimum na podzielonym spektrum fourierowskim. Często spotyka się inne nazwy omawianej metody: metoda HVSR (ang. Horizontal to Vertical Spectral Ratio), metoda H/V lub metoda QTS (ang. Quasi Transfer Spectra). Niewątpliwą zaletą metody jest możliwość łatwego przeprowadzenia pomiarów i następnie ich łatwa interpretacja. Zasadniczą kwestią, jaka pojawiła się w trakcie rozwoju metody, było pytanie, co powinno się mierzyć w trakcie eksperymentu pomiarowego. Otóż, według autora metody Nakamury, powinny to być mikrodrgania, których źródłem są obiekty na powierzchni ziemi, takie jak samochody czy maszyny przemysłowe, a także aktywność ludzi itp. Istnieje też odmiana metody, w której wykorzystywane są składowe pozioma i pionowa wstrząsów sejsmicznych, głównie fali poprzecznej S, ale sama technika obliczeń i interpretacji nie zmienia się. Założenie odnośnie do rodzaju źródeł, dla których mierzone są mikrodrgania powierzchni terenu spowodowało, że wśród badaczy pojawiły się pewne wątpliwości, czy metoda daje zawsze poprawne wartości współczynnika amplifikacji. Głównym źródłem wątpliwości był fakt, że mikrodrgania składają się w dużej mierze z fal typu Rayleigha, które są uznawane za fale nieużyteczne. Niektórzy z autorów, jak Lachet i Bard (1994), Bard (1998), Konno i Ohmachi (1998) wysunęli przypuszczenie, że w wielu wypadkach obserwowany pik w podzielonym spektrum fourierowskim może być wyjaśniony jako wpływ mody podstawowej fali Rayleigha i w związku z tym metoda Nakamury w takich sytuacjach daje błędne oszacowanie amplifikacji, która powinna odnosić się do składowej poziomej fali poprzecznej *SH*.

Powyższe niejasności zostały w sposób bardzo przejrzysty wyjaśnione przez Nakamurę (1989, 2000). Zauważył on, że pik pochodzący od podstawowej mody fazy Rayleigha na podzielonym spektrum fourierowskim, nie może występować dla częstotliwości rezonansowej warstwy, ale dla częstotliwości znacznie wyższych. Natomiast wokół częstotliwości rezonansowej warstwy energia tego typu fal jest bliska zeru, a więc nie może w sposób istotny wpływać na obserwowany pik. Mimo że podstawowe wątpliwości zostały rozwiane, to wciąż jeszcze trwają próby analizy metody Nakamury z użyciem różnego rodzaju modeli opisujących zjawisko amplifikacji. Metoda H/V jest obecnie powszechnie używana do oceny amplifikacji drgań i była wielokrotnie i z powodzeniem testowana w warunkach polowych (Teves-Costa, Matias i Bard, 1996; Theodulidis i in., 1996; Chaves-Garcia, Stephenson i Rodriguez, 1999; Castro i in., 2003).

## 3.2.3.3. Podstawy teoretyczne

Metoda Nakamury, jak stwierdzono w poprzednim podrozdziale, pozwala na wyznaczanie amplifikacji drgań składowej poziomej fali poprzecznej *SH* i częstotliwości rezonansowej warstwy. Szczegóły samej metody opisane są w pracach Nakamury (1989, 2000), skąd zaczerpnięto poniższy opis – rozpatrywano strukturę geologiczną przedstawioną na rysunku 3.7.



**Rys. 3.7.** Struktura geologiczna i schemat pomiaru amplifikacji drgań z wykorzystaniem metody *HVSR* 

Rejestrowane mikrodrgania można rozdzielić na fale Rayleigha i fale pozostałego typu, tzn. bezpośrednie, wielokrotnie odbite itd. Do oceny amplifikacji stosuje się następujące wzory (Nakamura, 1989, 2000):

$$H_s(f) = A_h(f)H_b(f) + H_R(f)$$
 (3.68a)

$$V_s(f) = A_v(f)V_b(f) + V_R(f)$$
 (3.68b)

$$W_h(f) = \frac{H_s(f)}{H_b(f)}$$
(3.68c)

$$W_{v}(f) = \frac{V_{s}(f)}{V_{b}(f)}$$
 (3.68d)

gdzie:

- $H_s(f)$  spektrum drgań składowej poziomej na powierzchni nadkładu,
- $V_s(f)$  spektrum drgań składowej pionowej na powierzchni nadkładu,
- *A<sub>h</sub>(f)* współczynnik wzmocnienia drgań składowej poziomej, pionowo padającej bezpośredniej fali wgłębnej,
- $A_v(f)$  współczynnik wzmocnienia drgań składowej pionowej, pionowo padającej bezpośredniej fali wgłębnej,
- $W_h(f)$  amplifikacja poziomej składowej drgań gruntu na powierzchni nadkładu warstw miękkich,
- $W_v(f)$  amplifikacja pionowej składowej drgań gruntu na powierzchni nadkładu warstw miękkich,
- $H_b(f)$  spektrum drgań składowej poziomej w podłożu,
- $V_b(f)$  spektrum drgań składowej pionowej w podłożu,
- $H_R(f)$  spektrum drgań składowej poziomej fali Rayleigha,
- $V_R(f)$  spektrum drgań składowej pionowej fali Rayleigha.

Funkcje  $W_h(f)$  i  $W_v(f)$  są współczynnikami wzmocnienia drgań dla składowej poziomej i pionowej względem drgań w podłożu.

Metodę QTS definiuje się jako iloraz spektrum składowej poziomej drgań  $H_s(f)$  do spektrum składowej pionowej drgań  $V_s(f)$  zarejestrowanych na powierzchni warstwy nadkładu (Nakamura, 1989)

$$QTS = \frac{W_h(f)}{W_v(f)} = \frac{H_s(f)}{H_b(f)} \frac{V_b(f)}{V_s(f)} = \frac{H_s(f)}{V_s(f)} \frac{V_b(f)}{H_b(f)} = \frac{H_s(f)}{V_s(f)} = = \frac{A_h(f)H_b(f) + H_R(f)}{A_v(f)V_b(f) + V_R(f)} = \frac{H_b(f)[A_h(f) + H_R(f)/H_b(f)]}{V_b(f)[A_v(f) + V_R(f)/V_b(f)]}$$
(3.69)

Wzór (3.69) można uprościć, przyjmując następujące, kluczowe dla metody, założenia:

- składowa pionowa drgań nie jest wzmacniana wokół częstotliwości, dla której wzmocnienie drgań składowej poziomej osiąga maksymalną wartość,
- spektra fourierowskie składowych poziomej i pionowej w twardym podłożu są porównywalne, czyli  $H_b/V_b \approx 1$ ,
- energia fal Rayleigha wokół częstotliwości rezonansowej warstwy jest bardzo mała, czyli  $H_R/H_b \approx 0$  i  $V_R/V_b \approx 0$ .

Na podstawie wzoru (3.69), przy przyjętych wyżej założeniach, otrzymuje się następujące oszacowanie amplifikacji według metody Nakamury

$$QTS = HVSR(f) = \frac{H_s(f)}{V_s(f)} \approx A_h$$

Podsumowując, metoda Nakamury polega na wyznaczaniu ilorazu spektrum składowej poziomej do pionowej drgań na powierzchni warstwy nakładu. Tak uzyskane spektrum powinno być dobrym oszacowaniem odpowiedzi w domenie częstotliwości dla warstwy przypowierzchniowej. Dzięki tej procedurze można wyznaczać częstotliwość rezonansową warstwy nadkładu i odpowiadającą jej wartość maksymalnego wzmocnienia drgań. Należy pamiętać o dwóch podstawowych założeniach stosowania metody:

 ośrodek geologiczny składa się ze sztywnej warstwy skalnej, na której zalega jedno- lub wielowarstwowy nadkład miękkich warstw nadkładu,

2) mikrodrgania propagują jako fale Rayleigha.

Z doświadczeń autora wynika, że dużo stabilniejsze i znacznie łatwiejsze jest szacowanie, z wykorzystaniem tej metody, częstotliwości rezonansowej warstwy.

## 3.2.3.4. Wyznaczanie amplifikacji drgań dla wstrząsów indukowanych eksploatacją górniczą

Zjawisko amplifikacji drgań obserwowane jest również dla wstrząsów górniczych. W tym przypadku należy jednak zwrócić uwagę na wiele kwestii, które nie są istotne dla trzęsień ziemi. Po pierwsze wstrząsy górnicze charakteryzują się szerszym zakresem widmowym drgań od 0,5 Hz do ponad 10 Hz i nie da się wydzielić jednej podstawowej częstotliwości. To powoduje, że metodyka określania współczynnika amplifikacji drgań z przeskalowanych amplitud spektralnych, dla wybranej jednej częstotliwości drgań, jest stosunkowo mało użyteczna. Takie podejście powoduje wielokrotne przewyższenie szczytowych

amplitud prędkości drgań rejestrowanych w całym paśmie częstotliwości użytecznych. Ponieważ prognoza drgań oparta jest na podaniu wypadkowej maksymalnej amplitudy, to również amplifikacja powinna uwzględniać szersze spektrum drgań, charakterystyczne dla wstrząsów z określonej klasy energetycznej. Po drugie, dla wstrząsów górniczych wysoka intensywność drgań występuje najczęściej w strefie epicentralnej. To stwarza pewne utrudnienie z rozdzieleniem wpływu amplifikacji drgań od kierunkowości emisji drgań. Z tej przyczyny również sama weryfikacja obliczeń teoretycznych przez wyniki pomiarowe staje się często mało wiarygodna.

Współczynnik amplifikacji drgań można określić na podstawie pomiarów z wykorzystaniem sieci sejsmicznych rozlokowanych w poziomie i w pionie oraz z zastosowaniem obliczeń analitycznych. Można stosować kilka technik pomiarowych i obliczeniowych, do których należą:

- 1. Zainstalowanie odpowiednio gęstej sieci punktów pomiarowych na powierzchni analizowanego obszaru tak, aby geometria sieci pozwalała na uwzględnienie lokalnej zmienności budowy geologicznej i topograficznej warstw nadkładu. Następnie, na podstawie pomiarów, opracowanie lokalnych równań empirycznych dla prognozy parametrów drgań w funkcji energii, odległości i amplifikacji. Dla stanowiska referencyjnego, względem którego obliczano amplifikację pod pozostałymi stanowiskami, proponuje się wykonanie pomiarów sejsmicznych i wyznaczenie parametru prędkości propagacji fali *S* w nadkładzie i miąższości nadkładu. Znajomość pomierzonych parametrów pozwala na wyznaczenie bezwzględnej amplifikacji drgań pod stacją referencyjną za pomocą metody analitycznej i kolejno na tej podstawie pod pozostałymi stanowiskami, z wykorzystaniem względnych współczynników amplifikacji.
- Dokonanie testowych pomiarów sejsmometrycznych (np. drgań parasejsmicznych czy mikrowstrząsów) i określenie współczynnika amplifikacji drgań na podstawie:
  - a) porównania drgań ze stanowiska na gruncie z drganiami ze stacji referencyjnej umieszczonej na twardej skale najczęściej badanie stosunku amplitud spektralnych "grunt/twarda skała" zarejestrowanych w tym samym kierunku (technika SSR ang. *Standard Spectral Ratio technique* Borcherdt, 1970; Chavez-Garcia i in., 1999; Triantafyllidis i in., 1999),
  - b) porównania drgań zarejestrowanych równocześnie na profilu pionowym i na podłożu skalnym pod warstwą nadkładu oraz na powierzchni

(technika SR stacja podziemna-stacja powierzchniowa HHSR, ang. *Horizontal to Horizontal Spectral Ratio* – Newmark i Rosenblueth, 1964; Okamoto, 1984; Olszewska i Mutke, 2018),

- c) badania stosunku spektralnego HVSR (drgań w kierunku poziomym do drgań pionowych) z jednej stacji sejsmometrycznej i określenie uprzywilejowanego okresu drgań własnych nadkładu w miejscu pomiaru i współczynnika amplifikacji drgań (Nakamura, 1989; Schlindwein i Koch, 2003; Dubiński i in., 2003a; Olszewska i Lasocki, 2004; Olszewska, 2008; Bard, 2008; Olszewska i Mutke, 2018).
- 3. Obliczanie i modelowanie drgań na podstawie rozwiązania analitycznego równania ruchu falowego dla określonych warunków brzegowych (w obliczeniach należy uwzględnić geometrię nadkładu miąższość w danym miejscu i dynamikę nadkładu jego tłumienie i prędkość propagacji fali sejsmicznej). Wyróżnia się amplifikację 1-D (jednowymiarową związaną z warstwami nadkładu zalegającymi poziomo, np. Sawarienskij, 1959; Haskell, 1960; Idriss i Seed, 1968; Schnabel, Lysmer i Seed, 1972; Okamoto, 1984; Mutke i Dworak, 1992; Lachet i Bard, 1994) oraz 2-D i 3-D (dwui trójwymiarową związaną z topografią terenu modelowaną numerycznie Olsen i Archuleta, 1996).

Jak wspomniano wcześniej zjawisko amplifikacji obserwuje się również dla wstrząsów sejsmicznych indukowanych eksploatacją górniczą. Przedstawiono kilka przykładów pomiarowych i interpretacyjnych amplifikacji drgań dla wstrząsów indukowanych działalnością górniczą w GZW. Pierwszym przykładem jest rejestracja prędkości i przyspieszenia drgań wykonana w otworze wiertniczym i równocześnie nad nim na powierzchni (rys. 3.8 i 3.9). Rejestracje przedstawione na rysunku 3.8 i 3.9 pochodzą z archiwum sejsmologicznego sieci GRSS GIG, ze stanowiska akcelerometrycznego Md umieszczonego w otworze 30-metrowym w Bytomiu-Miechowicach i ze stanowiska akcelerometrycznego powierzchniowego Mg posadowionego bezpośrednio nad otworem wiertniczym. Stacja ta powstała w ramach realizacji projektu infrastrukturalnego IS EPOS. Budowany obecnie w Głównym Instytucie Górnictwa Górnośląski System Obserwacji Geofizycznych GSOG (Mutke i in., 2019a) posiada już cztery takie stacje, co pozwala na lepsze rozumienie i dokładniejsze oszacowywanie zjawiska amplifikacji drgań od wstrząsów indukowanych działalnością górniczą, rejestrowanych z wykorzystaniem pionowej sieci sejsmometrycznej.


Rys. 3.8. Sejsmogram prędkości drgań obliczony za pomocą metody całkowania numerycznego przyspieszenia drgań na stacji w Bytomiu-Miechowicach (a – akcelerometr powierzchniowy, b – akcelerometr otworowy na głębokości 30 m) od górniczego wstrząsu sejsmicznego w dniu 11.08.2018 r., godz. 11:53:04,06, o magnitudzie M<sub>W</sub> = 3,9 w odległości epicentralnej 2900 m od stacji akcelerometrycznych (rejestracje znajdują się w archiwum GRSS GIG)



**Rys. 3.9.** Rejestracja przyspieszenia drgań na stacji w Bytomiu-Miechowicach (a – akcelerometr powierzchniowy, b – akcelerometr otworowy na głębokości 30 m) od górniczego wstrząsu sejsmicznego w dniu 11.08.2018 r., godz. 11:53:04,06, o magnitudzie  $M_W$  = 3,9 i w odległości epicentralnej 2900 m od stacji akcelerometrycznych (rejestracje znajdują się w archiwum GRSS GIG)

Analiza rysunku 3.8a, b wykazuje, że stosunek amplitud prędkości drgań poziomych zarejestrowanych na powierzchni do drgań zarejestrowanych 30 m pod powierzchnią ziemi zmienia się na przebiegu czasowym od 1,9 na kierunku *NS* do 5,1 na kierunku *EW*, co oznacza maksymalną amplifikację drgań dla całego zakresu rejestrowanych częstotliwości na kierunku *EW*, wynoszącą  $W_{EW_PGV}$  = 2,55, po uwzględnieniu dwukrotnego wzrostu amplitud prędkości na granicy ziemia-powietrze.

Analiza rysunku 3.9a, b umożliwia wyliczenie, że stosunek przyspieszenia drgań poziomych zarejestrowanych na powierzchni do drgań zarejestrowanych 30 m pod powierzchnią ziemi, zmienia się od 3,45 na kierunku *NS* do 7,2 na kierunku *EW*, co oznacza maksymalną amplifikację drgań dla całego zakresu rejestrowanych częstotliwości na kierunku *EW*, wynoszącą  $W_{EW_PGA}$  = 3,6, po uwzględnieniu dwukrotnego wzrostu amplitud na granicy ziemia-powietrze. Jest to więcej niż dla amplitud prędkości, jednak przyspieszenia są bardzo czułe na lokalne warunki geologiczne i wymiary geometryczne różnych obiektów i często powstają drgania lokalne o wyższej częstotliwości, niemające wpływu na szkody w obiektach budowlanych.

Amplifikacja przedstawiona powyżej została wyznaczona jako stosunek szczytowych amplitud z całego przebiegu czasowego drgań na powierzchni i drgań w podłożu (skale).

Za pomocą wzorów z podrozdziału 3.2.3.1 obliczono amplifikację dla 17,4 m nadkładu warstw miękkich (strefa niskich prędkości propagacji fali S) w otworze wywierconym pod stanowiskiem Md w Bytomiu-Miechowicach. Do obliczeń niezbędne są takie parametry, jak miąższość miękkich warstw nadkładu i prędkość propagacji fali poprzecznej w tym nadkładzie. W celu uzyskania tych parametrów nad otworem wiertniczym wykonano profilowanie sejsmiczne techniką wielokanałowej analizy fal powierzchniowych MASW (Park, Xia i Miller, 1999). MASW jest metoda sejsmiczna, która umożliwia wyznaczanie rozkładu prędkości fali S w skali głębokości, przez analizę powierzchniowych fal Rayleigha. W metodzie wykorzystuje się sposób rejestracji i przetwarzanie danych szeroko stosowane od wielu lat w sejsmice refleksyjnej dla potrzeb przemysłu naftowego. W tradycyjnej sejsmice fale Rayleigha uważane są jednak za szum, a w metodzie MASW fale te stanowią sygnał użyteczny i z tego powodu metoda wymaga nieco innego podejścia na etapie akwizycji i przetwarzania danych. Procedura MASW składa się z trzech etapów: akwizycji danych, obliczania krzywych dyspersji dla poszczególnych rekordów oraz inwersji tych krzywych w celu obliczenia krzywych prędkościowych. Wyniki

pomiarów i interpretacji przedstawiono na rysunku 3.10. W nadkładzie znajduje się 10 m glin z przewarstwieniami piasków, a niżej spękany dolomit o niskich prędkościach propagacji fali *S*, poniżej 500 m/s. Dopiero głębiej prędkość propagacji fali przekracza 800 m/s. Średnia prędkość propagacji fali *S* w nadkładzie 17,4 m wynosi  $V_{\text{sr}}$  = 300 m/s. Pierwsza częstotliwość rezonansowa warstw przy stacji sejsmicznej w Bytomiu-Miechowicach jest wyliczana z wykorzystaniem wzoru (3.67) na częstotliwość rezonansową drgań warstwy miękkiego nadkładu (reguła 1/4 długości fali) i wynosi  $f_{\text{rez1}}$  = 4,3 Hz.



**Rys. 3.10.** Profil prędkości propagacji fal poprzecznych z głębokością w rejonie stacji sejsmicznej w Bytomiu-Miechowicach wykonany techniką MASW

Obliczoną analitycznie amplifikację drgań w funkcji częstotliwości dla obszaru stacji sejsmicznej w Bytomiu-Miechowicach przedstawia rysunek 3.11. Z rysunku 3.11 można odczytać, że maksymalna wartość amplifikacji obliczonej analitycznie wynosi  $W_{oblicz}$  = 7,0 dla częstotliwości 4,5 Hz. Można zauważyć, że pierwsza częstotliwość rezonansowa warstwy nadkładu, wyznaczona z pomiarów sejsmicznych i z reguły 1/4 długości fali, jest niemal identyczna jak ta obliczona na podstawie równań analitycznych. Natomiast obliczona analitycznie amplifikacja drgań i uśredniona w paśmie częstotliwości od 2 do 10 Hz wynosi  $W_{amp}$  = 2,6.

Na rysunku 3.12 przedstawiono funkcję przejścia dla składowej poziomej EW (a) i składowej poziomej NS (b), na podstawie akcelerogramu zarejestrowanego od wstrząsu w dniu 11.08.2018 r., godz. 11:53:04,06, o magnitudzie  $M_W$  = 3,9 i w odległości epicentralnej 2900 m od stacji akcelerometrycznych. Amplifikacja wyznaczona została z akcelerogramu zarejestrowanego przez stację w Bytomiu-Miechowicach, przez podzielenie widma drgań na powierzchni przez widmo drgań w sztywnym podłożu 30 m pod ziemią (HHSR). Jest to jedna



**Rys. 3.11.** Amplifikacja obliczona analitycznie dla modelu wielowarstwowego wyznaczonego z pomiarów sejsmicznych



**Rys. 3.12.** Amplifikacja wyznaczona z rejestracji na stacji w Bytomiu-Miechowicach przez podzielenie widma drgań na powierzchni przez widmo drgań w sztywnym podłożu 30 m pod ziemią (HHSR), dla składowej poziomej *EW* (a) i *NS* (b) od górniczego wstrząsu sejsmicznego w dniu 11.08.2018 r., godz. 11:53:04,06, o magnitudzie *M<sub>W</sub>* = 3,9

z pewniejszych metod weryfikacji amplifikacji drgań z użyciem techniki bezpośrednich pomiarów. Na rysunku 3.12a, odnoszącego się do składowej poziomej EW, widoczny jest około dwunastokrotny wzrost amplitudy drgań na powierzchni w stosunku do rejestracji dołowej w zakresie częstotliwości 5-6 Hz. Ponieważ przy dzieleniu widm na rysunku 3.12a nie uwzględniono poprawek na podwojenie drgań na swobodnej granicy ziemia-powietrze, rzeczywista amplifikacja na składowej EW wynosiła około 6. Na rysunku 3.12b, odnoszącym się do składowej poziomej NS, widoczny jest około sześciokrotny wzrost amplitudy drgań na powierzchni w stosunku do rejestracji dołowej dla zakresu częstotliwości 6–7 Hz. Ponieważ przy dzieleniu widm na rysunku 3.12b nie uwzględniono poprawek na podwojenie drgań na swobodnej granicy ziemia-powietrze, rzeczywista amplifikacja na składowej EW wynosiła około 3. Wypadkowa amplifikacja drgań dla składowych poziomych na stanowisku w Bytomiu--Miechowicach wyniosła więc  $W_{\text{HHSR}}$  = 6,7 i była w bardzo dobrej korelacji z amplifikacją wyznaczoną analitycznie, wynoszącą  $W_{\text{analit}}$  = 7. Pewną różnicę obserwuje się w częstotliwości, przy której następuje maksymalna amplifikacja. Z metody analitycznej i z reguły 1/4 długości fali jest to częstotliwość 4,5–5,0 Hz, natomiast z pomiarów bezpośrednich i dzielenia widm na stanowiskach powierzchniowych i dołowych (technika HHSR) jest to częstotliwość 5,5-6,5 Hz.

Wyniki obliczeń analitycznych i pomiarów bezpośrednich amplifikacji drgań dla wstrząsów indukowanych na stacji sejsmicznej w Bytomiu-Miechowicach wskazują, że obie metody dają zbliżone wyniki, o ile dysponuje się odpowiednimi danymi wejściowymi do obliczeń analitycznych i odpowiednimi pomiarami bezpośrednimi.

Dla obszaru stacji sejsmicznej w Bytomiu-Miechowicach przeprowadzono również obliczenia amplifikacji drgań z użyciem techniki HVSR, czyli metody Nakamury (1989) polegającej w tym przypadku na dzieleniu widm dla składowych poziomych przez widma składowych pionowych zarejestrowanych na stanowisku powierzchniowym Mg. Wyniki opisano w artykule Olszewskiej i Mutke (2018). Wynika z nich, że amplifikacja wyznaczona techniką HVSR wynosi dla tego stanowiska  $W_{\text{HVSR}}$  = 9, przy częstotliwości 4,5 Hz. Jest to wynik zbliżony do wartości amplifikacji wyznaczonej bezpośrednio z podzielenia widma składowych poziomych drgań na górze i w sztywnej warstwie skalnej (technika HHSR). W przypadku tych obliczeń wyniki stanowią uśrednioną wartość dla kilkudziesięciu analizowanych rejestracji drgań (rys. 3.13).



**Rys. 3.13.** Amplifikacja drgań wyznaczona na stacji sejsmicznej w Bytomiu-Miechowicach z wykorzystaniem techniki HVSR i zweryfikowanej techniki HHSR (Olszewska i Mutke, 2018)

W przypadku amplifikacji mierzonej w systemie obserwacji pionowych (w otworach wiertniczych) pozostaje niepewność co do wielkości drgań rejestrowanych w otworze na stanowisku w twardym podłożu skalnym. Wynika to z możliwości nakładania się na ostateczny wynik rejestracji drgań fali odbitej od powierzchni i powracającej z warstwy nadkładu do sztywnego podłoża. W pewnych sytuacjach, gdy taka interferencja fal wystąpi, wartość amplifikacji drgań, wyznaczona technika HHSR, może być zawyżona. Dlatego najlepszym pomiarem do weryfikacji współczynnika amplifikacji drgań jest pomiar z zastosowaniem sieci sejsmologicznej poziomej i porównanie rejestracji z czujnika drgań na nadkładzie z blisko zainstalowanym czujnikiem drgań na wychodni sztywnego podłoża skalnego. Takie pomiary i weryfikacja obliczeń analitycznych współczynnika amplifikacji drgań zostały przedstawione w kolejnym przykładzie. Jednym z nielicznych przykładów poligonowych pomiarów amplifikacji drgań opartych na rejestracji z sieci powierzchniowej, spowodowanych wstrzasami górniczymi w polskich zagłębiach górniczych, są akcelerogramy przedstawione na rysunku 3.14 (Mutke i Dworak, 1992). Dla wstrząsu o energii sejsmicznej 2.10<sup>6</sup> J pomierzono przyspieszenia drgań zarejestrowane na 22-metrowym nadkładzie utworów czwartorzędowych w obszarze Bytomia (rys. 3.14a). Amplitudy były prawie dwukrotnie wyższe od zarejestrowanych na stanowisku referencyjnym usytuowanym na podłożu skalnym (rys. 3.14b). Uśredniony dla tego nadkładu rozkład współczynnika amplifikacji w funkcji częstotliwości drgań otrzymano na podstawie kilkudziesięciu zapisów wstrząsów o różnej energii sejsmicznej i różnej charakterystyce częstotliwościowej. Na rysunku 3.15 przedstawiono rozkład współczynnika amplifikacji obliczony



**Rys. 3.14.** Akcelerogramy wstrząsu o energii sejsmicznej 2·10<sup>6</sup> J zarejestrowane: a – na 22-metrowym nadkładzie czwartorzędowym, b – na skalnym podłożu triasowym (Mutke i Dworak, 1992)



**Rys. 3.15.** Rozkład współczynnika amplifikacji drgań *W*<sup>f</sup> określonego dla profilu geologicznego: a – krzywa teoretyczna, b – krzywa empiryczna (Mutke i Dworak, 1992)

teoretycznie – krzywa (a) i krzywą empiryczną – pomiarową (b). Określenie tego rozkładu było możliwe po wykonaniu analiz widmowych zarejestrowanych wstrząsów zarówno na stanowisku znajdującym się na 22-metrowym nadkładzie czwartorzędowym, jak i na stanowisku znajdującym się na podłożu skalnym. Widoczna jest dobra zgodność danych empirycznych z obliczeniowymi, co potwierdza zadowalającą dokładność metody szacowania wartości współczynnika amplifikacji *W*<sub>f</sub> przy zastosowaniu metody obliczeń analitycznych.

Szerokie badania zależności efektu sejsmicznego w GZW od właściwości nadkładu przeprowadzono w Głównym Instytucie Górnictwa w roku 1993

(Mutke i in., 1993) i w roku 2001 (Stec i in., 2001), a od roku 2017 badania prowadzone są w ramach projektu infrastrukturalnego EPOS PL (Olszewska i Mutke, 2018).

Warstwy przypowierzchniowe mogą stanowić twarde skały, wówczas drgania nie są modyfikowane przez nadkład i są porównywalne w różnych miejscach obserwacji. Z kolei miękkie warstwy nadkładu wpływają lokalnie na zmianę amplitud i charakterystykę częstotliwościowa drgań powierzchniowych (Sawarienskij, 1959; Okamoto, 1984; Mutke, 1991; Mutke i Dworak, 1992; Kokusho, 2017). W polskich zagłębiach górniczych występuje zróżnicowany nadkład warstw, co jest szczególnie istotne z punktu widzenia amplifikacji warstw czwartorzędowych. Uwzględnienie amplifikacji drgań przy opracowywaniu map zagrożenia sejsmicznego jest elementem niezbędnym w polskich zagłębiach górniczych. Równocześnie obserwuje się charakterystyczna częstotliwość drgań własnych warstw przypowierzchniowych. W zakresie częstotliwości rezonansowych drgania dochodzące do warstwy nadkładu są szczególnie mocno wzmacniane. Niekorzystna sytuacja ma miejsce wówczas, gdy rezonans warstwy nadkładu jest zbliżony do rezonansu budynków i budowli powierzchniowych. Rezonans warstw nadkładu ma więc istotny wpływ na makrorejonizację zagrożenia sejsmicznego badanego obszaru i również powinien być uwzględniany przy opracowywaniu map zagrożenia.

### 3.2.4. Kierunkowość drgań

Obserwacje makrosejsmiczne i rejestracje sejsmometryczne w różnych punktach wokół źródła (ogniska wstrząsu), zlokalizowanych w jednakowych odległościach, wskazują na różne wartości amplitudy drgań na powierzchni ziemi. Izolinie jednakowych amplitud prędkości lub przyspieszenia drgań nie tworzą idealnego koła wokół ogniska wstrząsu. Z pewnością część tych różnic można wytłumaczyć lokalną amplifikacją drgań, w tym również amplifikacją topograficzną. Jednak wiele zapisów nie sposób wytłumaczyć istnieniem jedynie zjawiska amplifikacji drgań przez nadkład. Bliższa analiza tych rejestracji, z równoczesną korelacją z mechanizmami wstrząsów, tektoniką obszaru epicentralnego i innymi czynnikami dowodzi, że przyczyną różnic rejestrowanych amplitud drgań może być silna kierunkowość radiacji fal. Wniosek taki można wysnuć po analizie kierunków radiacji amplitud zobrazowanych w układzie przestrzennym. Pierwsze kompleksowe badania radiacji sejsmicznej dla wstrząsów indukowanych działalnością górniczą w polskich zagłębiach górniczych przeprowadzono w ramach realizacji zadania 1.1 pn. *Propagacja fal* w górotworze LGOM wraz z jego weryfikacją w projekcie celowym nr 6 T12 0063 2002 C/05870 pn. System oceny oddziaływań sejsmicznych na powierzchnię wywołanych przez eksploatację złoża rud miedzi w zakładach górniczych LGOM (Lurka, Mutke i Dubiński, 2003).

Z uwagi na ocenę obciążeń dynamicznych w budynkach w odległościach bliskich od ogniska wstrząsu, ważne jest poznanie charakteru propagacji fal sejsmicznych dla różnych modeli ognisk wstrząsów. Porównanie propagacji pola falowego w polu bliskim i dalekim pozwala na zrozumienie ogromnej różnicy dynamiki drgań w różnych fragmentach górotworu. W sejsmologii dla opisania mechanizmu ogniska podstawowe znaczenie ma układ sił w postaci pary sił lub dwóch wzajemnie prostopadłych par sił (Gibowicz i Kijko, 1994; Marcak i Mutke, 2013). Charakterystyki takich źródeł mogą być opisane przez zbiór kątów określających przestrzenne położenie płaszczyzny pękania w ognisku i wzajemny układ źródło-punkt odbioru (Aki i Richards, 1980). W zasadzie wiedza o procesach trzęsień ziemi i wstrząsów górotworu opiera się na obserwacji fal sejsmicznych. Obserwuje się zazwyczaj pole przemieszczeń lub pole prędkości na różnych kierunkach i w różnych odległościach od ogniska. Opisu tego pola można dokonać za pomocą wybranych modeli ogniska. Z reguły reprezentantem ogniska wstrząsu może być odpowiednia superpozycja pojedynczych sił lub par sił.

Wektor przemieszczenia  $\mathbf{u}_{n}(\mathbf{x}, t)$  wywołany przez źródło sejsmiczne może być wyrażony jako konwolucja tensora momentu  $M_{pq}$  i funkcji Greena  $G_{np,q}$  (Aki i Richards, 1980)

$$\mathbf{u_n}(\mathbf{x}, t) = M_{pq} * G_{np,q} \tag{3.70}$$

Dla modelu ogniska wstrząsu wywołanego działaniem podwójnej pary sił, opisanej tensorem  $M_{pq}$  w źródle, wektor przemieszczenia można opisać równaniem (Aki i Richards, 1980; Niewiadomski, 1997)

$$\mathbf{u_n}(\mathbf{x}, t) = RP^{\text{near}} \frac{1}{4\pi\rho} \frac{1}{R^4} \int_{\frac{R}{\alpha}}^{\frac{R}{\beta}} \tau M_{pq} \left(t - \tau\right) d\tau + RP^{\text{inter}(\alpha)} \frac{1}{4\pi\rho\alpha^2} \frac{1}{R^2} M_{pq} \left(t - \frac{R}{\alpha}\right) - RP^{\text{inter}(\beta)} \frac{1}{4\pi\rho\beta^2} \frac{1}{R^2} M_{pq} \left(t - \frac{R}{\beta}\right) + RP^{\text{far}(P)} \frac{1}{4\pi\rho\alpha^3} \frac{1}{R} \frac{d}{dt} M_{pq} \left(t - \frac{R}{\alpha}\right) - RP^{\text{far}(S)} \frac{1}{4\pi\rho\beta^3} \frac{1}{R} \frac{d}{dt} M_{pq} \left(t - \frac{R}{\beta}\right)$$
(3.71)

gdzie:

 $M_{pq}$  – składowe tensora momentu,

 $\alpha$  – symbol dla grupy fal *P*,

 $\beta$  – symbol dla grupy fal *S*,

*RP*<sup>near</sup>, *RP*<sup>inter</sup>, *RP*<sup>far</sup> – współczynniki radiacji dla pola falowego bliskiego, pośredniego oraz dalekiego, przy czym:

$$\begin{split} RP^{\text{near}} &= 15\gamma_n\gamma_p\gamma_q - 3\gamma_n\delta_{pq} - 3\gamma_p\delta_{nq} - 3\gamma_q\delta_{np} \\ RP^{\text{inter}(\alpha)} &= 6\gamma_n\gamma_p\gamma_q - \gamma_n\delta_{pq} - \gamma_p\delta_{nq} - \gamma_q\delta_{np} \\ RP^{\text{inter}(\beta)} &= 6\gamma_n\gamma_p\gamma_q - \gamma_n\delta_{pq} - \gamma_p\delta_{nq} - 2\gamma_q\delta_{np} \\ RP^{\text{far}(\alpha)} &= \gamma_n\gamma_p\gamma_q \\ RP^{\text{far}(\beta)} &= \gamma_n\gamma_p\gamma_q - \gamma_q\delta_{np} \end{split}$$

Do obliczenia wizualizacji przestrzennej radiacji źródła sejsmicznego dla fal poprzecznych *SV* i *SH* zastosowana została formuła *RP*<sup>far(ß)</sup> (Lurka, Mutke i Dubiński, 2003). Obliczenia wykonano dla jednego z najsilniejszych wstrząsów w LGOM, zaistniałego pod miastem Polkowice w dniu 20.02.2002 r., o energii 1,5·10<sup>9</sup> J. Od tego wstrząsu zarejestrowano różne wartości amplitudy drgań na stanowiskach położonych w podobnych odległościach epicentralnych, ale w różnych kierunkach. Przyjęto, że przyczyną takich rejestracji może być silna kierunkowość radiacji amplitud. Rozwiązania radiacji przedstawiane w literaturze na obrazach płaskich nie pozwalają na czytelne wyjaśnienie problemu. W związku z powyższym w Zakładzie Geologii i Geofizyki Głównego Instytutu Górnictwa opracowano algorytm pozwalający na przedstawienie radiacji amplitud w przestrzeni. Dla analizowanego przykładu obliczeniowego przyjęto rozwiązanie mechanizmu wstrząsu zaistniałego w dniu 20.02.2002 r. dla modelu podwójnej pary sił (Gibowicz, 2002). Rozwiązanie to wskazuje na kierunek rozrywu przebiegający wzdłuż uskoku Rudna Główna.

Amplitudy przyspieszenia drgań na stanowisku nr 1 przy ul. Hubala (stanowisko nad uskokiem – odległość epicentralna 675 m) okazały się być ponad połowę mniejsze niż amplitudy przyspieszenia zarejestrowane na stanowisku nr 2 (ul. Miedziana – odległość epicentralna 840 m) i na stanowisku nr 3 (ul. Sosnowa – odległość epicentralna 680 m). Odległości epicentralne stanowisk są bardzo zbliżone, a różnica w ich lokalizacji polega na tym, że stanowiska nr 2 i 3 leżą poza uskokiem Rudna Główna.

Przestrzenne rozwiązanie radiacji amplitud fali *S* (fale o największych amplitudach w strefie epicentralnej) przedstawiono na rysunku 3.16. Wyniki obliczeń wskazują na uprzywilejowane kierunki przestrzennej radiacji amplitud drgań emitowanych z ogniska wstrząsu.



Rys. 3.16. Radiacja amplitud w przestrzeni dla fali poprzecznej *S* od wstrząsu w dniu 20.02.2002 r. o energii sejsmicznej *E* = 1,5·10° J w ZG Rudna z zaznaczeniem kierunku do trzech stanowisk sejsmometrycznych: 1 – stanowisko sejsmometryczne przy ul. Hubala, 2 – stanowisko sejsmometryczne przy ul. Miedzianej, 3 – stanowisko sejsmometryczne przy ul. Sosnowej; płaszczyzna czerwona – płaszczyzna poślizgu w mechanizmie podwójnej pary sił, płaszczyzna zielona – powierzchnia, kolor niebieski – obwiednie maksymalnych amplitud drgań w przestrzeni (Lurka, Mutke i Dubiński, 2003)

Na rysunku 3.16 bardzo wyraźnie widać, że promienie na drodze ognisko--stanowisko, wykazują ponad dwukrotnie większe amplitudy na stanowiskach nr 2 i 3 (ul. Miedziana i ul. Sosnowa) niż na stanowisku nr 3 (ul. Hubala). Na stanowisku ul. Hubala zarejestrowano około 700 mm/s<sup>2</sup>, natomiast na stanowiskach ul. Miedziana i ul. Sosnowa zapisy zdecydowanie przekroczyły 1000 mm/s<sup>2</sup>. Podobne obliczenia zostały przeprowadzone w GZW dla silnych wstrząsów z uskoku kłodnickiego (Lurka i Stec, 2005; Dubiński, Lurka i Stec, 2006), które również udokumentowały duży wpływ kierunkowości radiacji pola falowego na wartości rejestrowanych amplitud w różnych kierunkach od ogniska wstrząsu.

Innym źródłem kierunkowości radiacji drgań w przestrzeni, oprócz mechanizmu wstrząsu i amplifikacji drgań przez nadkład, jest przechodzenie fali sejsmicznej przez różne partie górotworu, stare zroby, strefy spękane. Najistotniejszym jednak elementem strukturalnym, który decyduje o wielkości energii sejsmicznej transmitowanej przez górotwór, jest obecność w ośrodku dużych uskoków. Uskok stanowi przeszkodę, która może istotnie zaburzyć transmisję energii sejsmicznej i spowodować jej koncentrację przed przeszkodą. Wielkość tej koncentracji zależy od stosunku energii falowej odbitej od przeszkody do energii fali przechodzącej. Czym większy jest ten stosunek, tym większe zaburzenie transmisji energii i większe różnice w parametrach rejestrowanych drgań. Energia sejsmiczna jest bowiem proporcjonalna do kwadratu amplitud prędkości drgań gruntu.

## Wybór parametrów pomiarowych do oceny intensywności drgań od wstrząsów indukowanych eksploatacją górniczą

W trzesieniach ziemi funkcjonuje wiele skal intensywności sejsmicznej, jednak w ostatnich latach jedną z najczęściej stosowanych jest zmodyfikowana skala Mercallego (MMI), w której poszczególnym stopniom intensywności przypisano pomiarowe wartości amplitud prędkości i przyspieszenia drgań (Wald i in., 1999a). Jak wynika z obserwacji sejsmiczności indukowanej, jeden parametr opisujący amplitudy drgań gruntu nie jest jednak wystarczający do oceny szkodliwości drgań. Z tego powodu przeprowadzono pionierskie kompleksowe badania korelacji obserwowanych skutków drgań (stopnia szkodliwości) od wstrząsów sejsmicznych indukowanych eksploatacją górniczą w LGOM, z innymi parametrami niż szczytowe amplitudy prędkości i przyspieszenia. Wyniki badań opisane są szczegółowo w sprawozdaniach cząstkowych z realizacji projektu celowego nr 6 T12 0063 2002 C/05870 i w raporcie końcowym z tego projektu (Dubiński i in., 2006a). Dla wstrząsów zaistniałych w KGHM w latach 2002–2005 zbadano korelację spektrów odpowiedzi, prędkości drgań, przyspieszenia drgań oraz częstotliwości drgań i czasu trwania z obserwowanymi wpływami dynamicznymi na budynki. W celu sporządzenia bazy wstrzasów do badań dokonano ich wyboru według kryterium szkodliwości oddziaływań na budynki w obszarze LGOM. Wstrząsy podzielono na trzy grupy:

- wstrząsy, które nie spowodowały żadnych uszkodzeń w budynkach i były słabo odczuwane na powierzchni,
- wstrząsy, które spowodowały jedynie pojedyncze lekkie uszkodzenia, głównie w budynkach w złym stanie technicznym, skutki w wyposażeniu mieszkań i były silnie odczuwane na powierzchni,
- wstrząsy, które spowodowały uszkodzenia elementów wykończeniowych w budynkach.

# Informacje o skutkach drgań z protokołów przeglądów wykonywanych przez poszczególne zakłady górnicze w LGOM

Badania prowadzone w ramach ww. projektu (Dubiński i in., 2006a) wykazały, że spektra odpowiedzi, czyli dwuparametryczny wskaźnik – amplituda odpowiedzi i częstotliwość drgań własnych budynku – dobrze korelują ze skutkami i mogą być kryterium pomiarowym stopni intensywności sejsmicznej opisującym szkodliwość drgań. Spektra odpowiedzi są jednak dość skomplikowanym parametrem dla prognozy sejsmiczności indukowanej na obszarze w skali lokalnej lub regionalnej. Oprócz prognozy samych odpowiedzi spektralnych przy ocenie niezbędna jest też znajomość częstotliwości rezonansowej budynków. Stąd poszukiwano jeszcze bardziej dostępnych prognostycznie parametrów kryterialnych. Uzyskane wyniki pomiarów i obliczeń wykazały, że dobrą korelację pomiarowych stopni intensywności sejsmicznej, opisujących określone skutki w zabudowie i jej wyposażeniu, uzyskano dla oceny prowadzonej według dwóch parametrów drgań gruntu, a mianowicie szczytowej amplitudy prędkości drgań składowych poziomych  $PGV_{Hmax}$ , obliczanej według wzoru (2.13) i czasu trwania głównej fazy drgań  $t_{Hv}$ , obliczanego według wzoru (2.14). Nieco gorszą korelację uzyskano dla innej pary parametrów kryterialnych, tj. szczytowej amplitudy przyspieszenia drgań składowych poziomych w paśmie częstotliwości do 10 Hz  $PGA_{H10max}$ , obliczanej według wzoru (2.15) i czasu trwania głównej fazy drgań  $t_{Ha}$ , obliczanego według wzoru (2.16).

Dla obszaru Górnego Śląska opracowano skale GSI-2008 i GSI<sub>GZWKW</sub>-2012, w których do oceny intensywności sejsmicznej wykorzystano dwuparametryczne kryterium, czyli szczytową amplitudę prędkości drgań i czas trwania głównej fazy drgań.

Podstawowa wątpliwość dotycząca proponowanych parametrów kryterialnych wiąże się z pytaniem, dlaczego nie stosować szczytowego parametru prędkości drgań gruntu PGV<sub>Hmax</sub> i częstotliwości drgań f, jak w wielu skalach europejskich, do pomiaru drgań antropogenicznych pochodzących od: ruchu ulicznego, działalności przemysłowej, pracy maszyn budowlanych czy urabiania skał w kamieniołomach za pomoca ładunków wybuchowych. Takimi skalami są na przykład niemiecka norma DIN 4150-3, austriacka ÖNORM S 9020, szwajcarska SN 640312A oraz stosowana w Polsce skala wpływów dynamicznych SWD-I i SWD-II (Tatara, 2012). Należy także zauważyć, że wszystkie ww. skale odnoszą swoje wartości nie do drgań gruntu, tylko do drgań pomierzonych na fundamentach PGV<sub>fund</sub> ocenianych budynków, a ocena budynku sąsiedniego wymaga wykonania ponownych pomiarów. Co prawda skale SWD dopuszczają pomiar drgań na gruncie w przypadku oceny wymienionych wyżej drgań antropogenicznych, ale tylko w przypadku wykorzystywania ich do obiektów projektowanych. Jednak w przypadku stosowania skal SWD cały zarejestrowany sygnał amplitudowy musi być poddany analizie tercjowej. Wymienione wyżej wymogi stosowania skal europejskich do prognozy sejsmicznej dla większego obszaru i do wykreślania map izolinii drgań i izolinii intensywności (ang. shake *maps*), są bardzo trudne do spełnienia w codziennej praktyce inżynierskiej.

Wykonanie map prognozy sejsmicznej to pierwszy powód, dla którego stosowanie jako wartości kryterialnej pary parametrów, tj. amplitudy  $PGV_{\text{fund}}$ i częstotliwości f, nie jest wskazane do oceny intensywności wstrząsów sejsmicznych indukowanych eksploatacją górniczą. Silne wstrząsy górnicze o magnitudzie rzędu 3-4 przenoszą swoje istotne drgania w odległościach rzędu kilku kilometrów od epicentrum, w przeciwieństwie do bardzo lokalnych oddziaływań antropogenicznych, dla których przeznaczone są ww. skale. Ale jest jeszcze drugi ważniejszy powód. Otóż czestotliwość drgań na powierzchni od górniczych wstrząsów sejsmicznych zawiera się w przedziale od 0,5 do 15 Hz (Mutke, 1991). Pokrywa więc zakres pierwszej częstotliwości rezonansowej całej typologii zabudowy od wysokich smukłych wieżowców, po budynki wielopiętrowe i małe obiekty, jak domy jednorodzinne. Okazuje się jednak, że nawet bardzo wysokie amplitudy drgań PGV<sub>Hmax</sub>, w pewnych sytuacjach, nie wywołują skutków w żadnym typie zabudowy. Dzieje się tak, gdy drgania wymuszające charakteryzują się bardzo krótkim czasem trwania, często przypominającym wymuszenie jednoimpulsowe. I chociaż rejestrowane drgania będą w takiej sytuacji charakteryzowały się częstotliwościa głównej fazy poniżej 10 Hz, to nie wywołają one reakcji w budynkach w formie odpowiedzi wzmacniającej drgania. A taka odpowiedź jest oczekiwana w celu zaistnienia na tyle dużych sił dynamicznych w budynku, aby wywołać uszkodzenia. Tak więc przy ograniczonym paśmie częstotliwości drgań wymuszających, elementem decydującym o odpowiedzi dynamicznej budynku, jest czas trwania drgań. W dalszej części rozdziału zostały przedstawione podstawy obliczeniowe potwierdzające opisane wyniki obserwacji sejsmicznej prowadzonej w LGOM i w GZW.

## 4.1. Spektra odpowiedzi a obserwowane skutki drgań w zabudowie

Spektra odpowiedzi niosą w sobie informacje zarówno o samym wstrząsie, jak i o reakcji różnych typów budynków na wymuszenie wywołane tym wstrząsem. Ponadto spektra odpowiedzi zawierają również czynnik czasu trwania drgań wymuszających, co wykazano w następnym podrozdziale. Spektra były liczone przy przyjęciu ułamka tłumienia  $\beta = 0,05$ . Obliczenia prowadzono tylko dla przypadków, dla których posiadano informacje o skutkach wywołanych przez wstrząs (Dubiński i in., 2004b).

Jako przykład obliczeniowy przedstawiono jeden z najsilniejszych wstrząsów zaistniałych w LGOM w dniu 20.02.2002 r., o energii sejsmicznej  $E = 1,5 \cdot 10^9$  J, zlokalizowany pod miastem Polkowice. Po wstrząsie odnotowano 1436 zgłoszeń szkód, w tym 1186 w mieniu nieruchomym i 250 w mieniu ruchomym.

## 4.1.1. Ogólna charakterystyka makrosejsmiczna wstrząsu w dniu 20.02.2002 r. w Polkowicach

Wstrząs, do którego doszło 20.02.2002 r., spowodował liczne uszkodzenia niekonstrukcyjne budynków w Polkowicach. Nie stwierdzono natomiast żadnych uszkodzeń konstrukcyjnych. W zabudowie kubaturowej miasta wstrząs spowodował uszkodzenia głównie w postaci zarysowań i pęknięć na styku różnych elementów. Wstrząs był mocno odczuwany przez mieszkańców Polkowic. Wielu z nich wystraszyło się, a nawet uległo panice. Z wysokich budynków mieszkańcy wybiegali na zewnątrz. Przy ul. Hubala odczuwano jakby zapadanie się budynku, a następnie jego kołysanie i lekkie skręcanie. Trzeszczały ściany. W wysokich budynkach doszło do szkód w ruchomościach. Przewracały się meblościanki. Z półek spadały przedmioty luźno stojące. Awarii uległa winda w wysokim budynku.

## 4.1.2. Spektrum odpowiedzi i skutki obserwowane w budynkach z wielkiej płyty

W budynkach z wielkiej płyty o częstotliwości drgań własnych f = 1,2-4,5, zlokalizowanych w rejonie zarejestrowanych drgań przy ul. Kolejowej, zaobserwowano następujące szkody: spękanie gładzi gipsowej, pionowe spękania ściany działowej, spękania przy drzwiach wejściowych, popękane płytki na ścianie z blokiem kominowym, poziome rysy na suficie, pionowe rysy gładzi gipsowej w narożniku ścian, okrajanie ściany przy suficie, ukośne pęknięcie ściany przy drzwiach do łazienki i przy drzwiach wnękowych, pionowe pęknięcia na kominie wentylacyjnym i w narożniku ścian, pęknięcia płytek na podłodze, poziome pęknięcia na całej długości balkonu nad oknami, pęknięcie zewnętrznej szyby okiennej.

Analiza pseudoprędkościowego spektrum odpowiedzi pokazała, że ww. wstrząs charakteryzował się największą odpowiedzią spektralną w zakresie częstotliwości drgań własnych budynków od 2,5 do 8 Hz, na poziomie od 2 do 4 m/s<sup>2</sup>, przy czym maksymalna odpowiedź wystąpiła na częstotliwości 4 i 6 Hz. Wartości na spektrach odpowiedzi obniżały się dla częstotliwości drgań własnych powyżej 10 Hz (rys. 4.1).

Można podsumować, że opisane wyżej uszkodzenia elementów niekonstrukcyjnych wystąpiły pod wpływem reakcji budynków na obciążenia dynamiczne i wywołanie niskoczęstotliwościowych szczytowych amplitud odpowiedzi budynku od 0,2g do 0,4g (gdzie g jest przyspieszeniem ziemskim).



**Rys. 4.1.** Pseudoprzyspieszeniowe spektrum odpowiedzi składowych poziomych drgań dla wstrząsu w dniu 20.02.2002 r., zarejestrowanego na stanowisku przy ul. Kolejowej w Polkowicach

## 4.1.3. Spektrum odpowiedzi i skutki obserwowane w wysokich dwunastopiętrowych budynkach z wielkiej płyty (podatnych)

W budynkach dwunastopiętrowych z wielkiej płyty (podatnych) (fot. 4.1), o częstotliwości drgań własnych  $f_{rez1} = 1,1-1,3$  Hz, zlokalizowanych w rejonie zarejestrowanych drgań, zaobserwowano następujące szkody:

- zarysowania i spękania warstw wykończeniowych na elewacji wschodniej i zachodniej w poziomie parteru,
- częściowe uszkodzenie tynku i zarysowania na stykach między blokami ściennymi i drzwiowymi w klatkach schodowych,
- zarysowanie i częściowe zniszczenie tynku w miejscu oparcia biegu schodowego na płycie podestowej,
- odspojenie ścian działowych od słupów żelbetowych w poziomie parteru.



**Fot. 4.1.** Budynki dwunastopiętrowe z wielkiej płyty przy ul. Hubala w Polkowicach

Analiza pseudoprzyspieszeniowego spektrum odpowiedzi (rys. 4.2) pokazała, że wstrząs zarejestrowany przy ul. Hubala charakteryzował się odpowiedzią spektralną w zakresie częstotliwości drgań własnych od 1,0 do 2,0 Hz – od 1,5 do 2,5 m/s<sup>2</sup>. Maksymalna odpowiedź wystąpiła na częstotliwości od 2 do 4 Hz ( $SA = 2,8 \text{ m/s}^2$ ). Budynki dwunastopiętrowe przy ul. Hubala, w których wystąpiły opisane wyżej szkody, charakteryzowały się częstotliwością drgań własnych pierwszego rezonansu  $f_{\text{rez1}}$  w zakresie od 1,1 do 1,3 Hz. Obliczona odpowiedź spektralna dla tych częstotliwości 2,0–2,5 Hz wartość  $SA = 2,8 \text{ m/s}^2$ . Rejestracje drgań na czujniku zamocowanym na ostatniej kondygnacji przekroczyły ustawiony poziom  $PGV_{H10\text{max}} = 1,4 \text{ m/s}^2$  (rys. 4.3). Co jeszcze bardziej istotne, drgania na ostatnim piętrze (reakcja budynku) trwały wyjątkowo długo jak na wstrząs górniczy,  $t_{H10} = 7,5$  s. Tak długo trwające drgania rezonansowe spowodowały po tym wstrząsie większe szkody w budynku przy ul. Hubala, niż w innych budynkach w Polkowicach.

Można podsumować, że uszkodzenia elementów niekonstrukcyjnych opisane wyżej wystąpiły pod wpływem reakcji budynków na obciążenia dynamiczne i wywołane niskoczęstotliwościowe (do 3 Hz) pikowe amplitudy odpowiedzi budynku 0,15–0,3g (gdzie g jest przyspieszeniem ziemskim).

Dla zbioru wstrząsów, po których nie obserwowano szkód w budynkach, i które były słabo odczuwane przez mieszkańców, maksymalne wartości przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi nie przekraczały  $SA = 1 \text{ m/s}^2$  dla częstotliwości rzędu 1–5 Hz, a wartość mediany *SA* nie przekraczała wartości 0,4 m/s<sup>2</sup> dla częstotliwości do 10 Hz (rys. 4.4) (Dubiński i in., 2004b).



**Rys. 4.2.** Pseudoprzyspieszeniowe spektrum odpowiedzi dla wstrząsu w dniu 20.02.2002 r., zarejestrowanego na stanowisku przy ul. Hubala w Polkowicach



**Rys. 4.3.** Reakcja budynku przy ul. Hubala, zarejestrowana na ostatniej 12 kondygnacji (rejestracje z dwóch poziomych akcelerometrów, zainstalowanych prostopadle do siebie na ścianach nośnych budynku) na wstrząs w dniu 20.02.2002 r.



**Rys. 4.4.** Przyspieszeniowe spektra odpowiedzi (5% tłumienia) w LGOM dla wstrząsów, w wyniku których nie zaobserwowano szkód w budynkach, i które były słabo odczuwane przez mieszkańców – obliczenia ze składowych poziomych drgań

Spektra odpowiedzi okazały się być dobrą miarą kryterialną oceny szkodliwości drgań wstrząsów indukowanych eksploatacją rud miedzi w LGOM.

## 4.2. Czas trwania drgań i jego wpływ na reakcję obiektu budowlanego

Wpływ czasu trwania drgań na reakcję obiektu budowlanego lub na intensywność sejsmiczną był przedmiotem wielu badań (np. Arias, 1970; Trifunac i Brady, 1975; Mutke, 1991; Dubiński i Mutke, 2001; Zembaty, 2002; Jaśkiewicz i in., 2004; Zembaty, 2004; Dubiński i in., 2004b; Jaśkiewicz-Proć, 2012; Barbosa, Ribciro i Neves, 2017; Pachla i in., 2018). Badania prowadzone były zarówno w formie obserwacji makrosejsmicznych i interpretacji rejestracji sejsmometrycznych, jak i modelowania odpowiedzi budynku na drgania wymuszające. Kompleksowe badania wpływu czasu trwania drgań od wstrząsów górniczych na intensywność sejsmiczną i obserwowane makroskopowo uszkodzenia, przeprowadzono w ramach projektu celowego (Dubiński i in., 2006a). W latach 2002–2003 w Polkowicach zainstalowano kilka rejestratorów powierzchniowych prędkości i przyspieszenia drgań, w tym w dwóch wysokich budynkach czujniki rejestrowały równocześnie drgania gruntu, fundamentu, ściany nośnej na piątym i na jedenastym piętrze. Takie pomiary pozwoliły na badanie rzeczywistej reakcji (odpowiedzi budynku) na wymuszenia dynamiczne i weryfikowanie obliczeń analitycznych i numerycznych.

Większość wstrząsów w LGOM rejestrowanych w obszarze epicentralnym charakteryzuje się krótkim czasem trwania w formie jednego piku wysokiego przyspieszenia. Jak pokazują doświadczenia empiryczne, wstrząsy te nie powodowały uszkodzeń w budynkach, nawet przy przyspieszeniach drgań podłoża powyżej 1000 mm/s<sup>2</sup>. Równocześnie wstrząsy te dawały stosunkowo niskie wartości przyspieszeniowych spektrów odpowiedzi dla częstotliwości z zakresu drgań własnych budynków. Stwierdzone uszkodzenia elementów wykończeniowych wystąpiły po kilku silnych wstrząsach charakteryzujących się długim czasem trwania i wysokimi amplitudami przyspieszenia lub prędkości drgań z zakresu niskich częstotliwości (1–5 Hz).

Reakcja budynku i wywołane wstrząsem siły dynamiczne w budynku korelują ze skutkami drgań. Jeżeli wstrząs nie wywoła odpowiedniej odpowiedzi budynku na wymuszenie dynamiczne, to nie spowoduje skutków w tym obiekcie. Badanie wpływu charakterystyk drgań wymuszających na reakcję budynków o określonych częstotliwościach drgań własnych oparto na modelowaniu spektrów odpowiedzi. Zaobserwowano bowiem, że wstrząsy o krótkich czasach trwania (do około 1–3 s) i bardzo dużych amplitudach prędkości lub przyspieszenia drgań, nie powodowały skutków w zabudowie. Przy podobnym poziomie amplitud drgań, ale przy zwiększającym się czasie ich trwania do ponad 3 s i od kilku do kilkunastu następujących po sobie impulsów, wstrząsy powodowały uszkodzenia w obiektach budowlanych i w wyposażeniu mieszkań.

W celu analizy teoretycznej i przedstawienia wpływu czasu trwania sygnału sejsmicznego na wielkość i kształt spektrów odpowiedzi przeprowadzono odpowiednie modelowanie. W tym celu w programie Mathcad napisano procedurę obliczania spektrów odpowiedzi. W programie tym generowano proste i złożone sygnały drgań wymuszających, a następnie obliczano dla nich przyspieszeniowe spektra odpowiedzi. Charakterystyka modelowanych drgań wymuszających określana była na podstawie rzeczywistych akcelerogramów. Przeprowadzono badania teoretyczne nad oszacowaniem wpływu czasu trwania drgań na wielkość odpowiedzi budynku. Badania potwierdziły obserwacje empiryczne, że pojedyncze piki wymuszające nie są w stanie wzbudzić bardzo dużej odpowiedzi, w przeciwieństwie do wstrząsów o długim czasie trwania (przy tej samej maksymalnej amplitudzie wymuszenia i przy takiej samej charakterystyce częstotliwości drgań). Oba wymuszenia różnią się jedynie czasem trwania.

Poniżej przedstawiono obrazy obliczonych spektrów odpowiedzi dla charakterystyk drgań wymuszających, różniących się jedynie czasem trwania głównej fazy drgań. Algorytm stosowany do modelowania drgań wymuszających i obliczania odpowiedzi w budynkach dla modelu oscylatora o jednym stopniu swobody, opierał się na rozwiązaniu Nigama i Jenningsa (1969) i został zaimplementowany do obliczeń w programie Mathcad.

Na terenie LGOM, biorąc pod uwagę efekty powierzchniowe, występują dwa podstawowe rodzaje wstrząsów sejsmicznych:

- o krótkich czasach trwania i charakterze drgań przypominającym jeden, dwa impulsy (czasami o dużych przyspieszeniach i niewielkich prędkościach drgań lub o dużych przyspieszeniach i dużych prędkościach drgań),
- 2) o długich czasach trwania i charakterze drgań wieloimpulsowym, czasami podobnych do najsłabszych, płytkich trzęsień ziemi.

Pierwsze są na ogół mało szkodliwe dla budynków, nawet w przypadku wysokich amplitud prędkości drgań, a drugie w przypadku osiągnięcia wysokich amplitud prędkości drgań, mogą powodować szkody w budynkach.

Przykładową rejestrację silnego wstrząsu sejsmicznego pierwszego typu przedstawia rysunek 4.5 (wstrząs na obszarze GZW w dniu 24.08.2007 r., o energii sejsmicznej  $E = 4 \cdot 10^6$  J). Czas trwania drgań składowych poziomych tego zjawiska sejsmicznego wynosił  $t_{Hv} = 1,28$  s (rys. 4.6), a więc był to czas bardzo krótki. Po tym wstrząsie nie odnotowano szkód w budynkach, mimo że amplitudy prędkości drgań osiągnęły ponad 30 mm/s, a przyspieszenia drgań nawet 1,14 m/s<sup>2</sup>. Częstotliwość drgań składowych poziomych głównej fazy prędkości drgań wynosiła od 3,2 do 8,5 Hz. Spektrum odpowiedzi dla 2 i 5 Hz wynosiło  $SA_{2Hz} = 0,2$  m/s<sup>2</sup> i  $SA_{5Hz} = 1,4$  m/s<sup>2</sup>.







**Rys. 4.6.** Czas trwania prędkości drgań gruntu dla wstrząsu na obszarze GZW w dniu 24.08.2007 r. – składowa pozioma *X*: czas trwania 0,95 s (a), składowa pozioma *Y*: czas trwania 1,28 s (b)

Przykładową rejestrację silnego wstrząsu sejsmicznego drugiego typu przedstawia rysunek 4.7 (wstrząs na obszarze LGOM w dniu 20.02.2002 r., godz. 12:27, o energii sejsmicznej  $E = 1,5 \cdot 10^9$  J). Czas trwania drgań składowych poziomych tego zjawiska sejsmicznego wynosił  $t_{Hv} = 4,9$  s, a więc był to czas długi jak na wstrząs górniczy w strefie epicentralnej. Po tym wstrząsie odnotowano liczne uszkodzenia elementów niekonstrukcyjnych w wysokich budynkach przy ul. Hubala w Polkowicach, opisane szczegółowo na początku tego rozdziału. Amplitudy prędkości drgań składowych poziomych osiągnęły  $PGV_{Hmax} = 85$  mm/s na fundamencie, a przyspieszenia drgań do 10 Hz  $PGA_{H10max} = 0,907$  m/s<sup>2</sup>. Częstotliwość drgań składowych poziomych głównej fazy prędkości drgań wynosiła od 0,8 do 1,35 Hz. Spektrum odpowiedzi dla 2 i 5 Hz wynosiło  $SA_{2Hz} = 2,8$  m/s<sup>2</sup> i  $SA_{5Hz} = 1,7$  m/s<sup>2</sup>.



**Rys. 4.7.** Sejsmogram prędkościowy drgań gruntu dla wstrząsu na obszarze LGOM w dniu 20.02.2002 r., godz. 12:27, o energii sejsmicznej  $E = 1,5 \cdot 10^9$  J; czas trwania składowych poziomych drgań wynosił  $t_{Hv} = 4,9$  s

Mimo porównywalnych szczytowych przyspieszeń drgań od wstrząsu typu 1 i typu 2 oraz częstotliwości głównej fazy drgań, której wartość dla obu górniczych wstrząsów sejsmicznych była niższa niż 10 Hz, wyraźnie widać, że obserwowane skutki drgań w budynkach i wartości spektrów odpowiedzi dla częstotliwości 2 i 5 Hz były zdecydowanie różne dla obu zjawisk.

W celu wyjaśnienia tak różnych reakcji budynków na wstrząsy o podobnym poziomie przyspieszeń wymuszających i częstotliwości głównej fazy drgań wynoszącej w obu typach wstrząsów mniej niż 10 Hz, wykonano modelowanie spektrów odpowiedzi przy wykorzystaniu algorytmu Nigama i Jenningsa (1969).

Analizowano dwa typy wymuszenia z uwagi na czas trwania drgań, mające cechy charakterystyczne wstrząsów górniczych. W obu przypadkach częstotliwość drgań wymuszających zbliżona była do częstotliwości drgań własnych oscylatora (budynku), dla którego obliczano odpowiedź.

## Wstrząs o krótkim czasie trwania – impuls

Harmoniczne drgania podłoża  $S(t) = 100 \text{ mm/s}^2 \text{ w}$  formie jednego impulsu o częstotliwości sygnału  $f_s = 1,5$  Hz i czasie trwania 0,5 s, spowodowały odpowiedź oscylatora dla częstotliwości drgań własnych  $f_0 = 1,5$  Hz wynoszącą  $Z(t) = 125 \text{ mm/s}^2$ . Przy tak krótkim czasie wymuszenia drgań (około 0,5 s) praktycznie nie zarejestrowano wzmocnionej reakcji oscylatora i obliczone amplitudy odpowiedzi były zbliżone do amplitud drgań podłoża (rys. 4.8).

## Wstrząs o długim czasie trwania (4 s)

Harmoniczne drgania podłoża  $S(t) = 100 \text{ mm/s}^2$  w formie kilkunastu impulsów o częstotliwości sygnału  $f_s = 1,5$  Hz i czasie trwania 4,0 s spowodowały odpowiedź oscylatora dla częstotliwości drgań własnych  $f_0 = 1,5$  Hz wynoszącą  $Z(t) = 330 \text{ mm/s}^2$  (rys. 4.9). Przy długim czasie trwania drgań wymuszających, oscylator wszedł w reakcję dynamiczną i obliczone amplitudy odpowiedzi były ponad trzy razy wyższe od amplitud drgań podłoża. Trzeba dodać, że amplitudy drgań wymuszających były w tym przypadku identyczne jak zastosowane w poprzednim obliczeniu dla wymuszenia impulsowego (rys. 4.9).



**Rys. 4.8.** Odpowiedź oscylatora w paśmie  $f_0$  = 1,5 Hz na drgania podłoża o częstotliwości f = 1,5 Hz i o krótkim czasie trwania



**Rys. 4.9.** Odpowiedź oscylatora w paśmie  $f_0$  = 1,5 Hz na drgania podłoża o częstotliwości f = 1,5 Hz i o długim czasie trwania

Przy wymuszeniu krótkotrwałym odpowiedź oscylatora o jednym stopniu swobody (modelu budynku) była wyraźnie mniejsza (prawie trzy razy) niż dla tej samej amplitudy i częstotliwości drgań wymuszających, ale o dłuższym czasie trwania. Należy podkreślić, że jest to dość typowy przypadek dla sejsmiczności indukowanej eksploatacją górniczą, gdy większość wstrząsów sejsmicznych charakteryzuje się krótkim czasem trwania i częstotliwością poniżej 1 Hz. Jak wynika z obserwacji makrosejsmicznych, takie impulsy sejsmiczne nie stanowią poważnego zagrożenia dla powierzchni, mimo wysokich amplitud, szczególnie przyspieszenia drgań. Wstrzasy o długich czasach trwania drgań, np. zjawiska sejsmiczne, których geneza jest aktywowanie przez eksploatację przemieszczeń w strefach tektonicznych, wywołują dużo wiekszą reakcję budynków i przy odpowiednim poziomie amplitud drgań mogą powodować dość poważne skutki w zabudowie powierzchniowej. W spektrach odpowiedzi zawarty jest wpływ zarówno amplitud wymuszenia podłoża, częstotliwości drgań, jak i czasu ich trwania. Należy podkreślić, że tak duża różnorodność zjawisk wymuszających drgania budynków występuje w przypadku wstrzasów górniczych. Sytuacja taka nie jest raczej typowa dla trzesień ziemi. Dlatego przy konstrukcji skali górniczej należy uwzględniać te kwestie i nie da się wprost wykorzystać jedynie badań opisanych dla trzęsień ziemi.

W artykule Pachli i innych (2018) przedstawiono wyniki badań modelowania numerycznego i reakcję pięciokondygnacyjnego budynku na drgania podłoża od wstrząsów górniczych i od trzęsień ziemi, które różniły się czasami trwania. Wyniki obliczeń potwierdzają założenia metodyczne przyjęte w skalach górniczych, że czas trwania intensywnej fazy drgań wymuszających jest jedną z przyczyn skutków obserwowanych w badanym obiekcie budowlanym.

Parametr czasu trwania drgań, analizowany łącznie ze szczytową amplitudą prędkości, jest podstawowym parametrem kryterialnym zastosowanym do oceny stopni intensywności w skali dla zjawisk sejsmicznych indukowanych eksploatacją górniczą.

## 5. Górnicze skale intensywności sejsmicznej

W górniczych skalach intensywności sejsmicznej oddziaływanie wstrząsu wyrażane jest przez pomiarowe stopnie intensywności sejsmicznej (Mutke i in., 2015a, 2018), które są klasyfikowane na podstawie rejestrowanych lub prognozowanych parametrów drgań podłoża, i które są skorelowane z obserwacjami makrosejsmicznymi w budynkach, opisanymi przez stopnie szkodliwości drgań. Tego rodzaju skale zalicza się do pomiarowych skal intensywności (Wald i in., 1999a; 1999b, 2005).

## 5.1. Górnicze skale intensywności sejsmicznej dla obszaru LGOM

Prace nad Górniczą Skalą Intensywności Sejsmicznej GSI-2004 rozpoczęły się od realizacji projektu celowego nr 6 T12 0063 2002 C/05870 pn. *System oceny oddziaływań sejsmicznych na powierzchnię wywołanych przez eksploatację złoża rud miedzi w zakładach górniczych LGOM* pod kierunkiem prof. Józefa Dubińskiego. Projekt finansowany przez Komitet Badań Naukowych (KBN) i KGHM Polska Miedź SA był realizowany w latach 2002–2005. Głównym wykonawcą projektu był Główny Instytut Górnictwa w Katowicach, a współwykonawcami byli: KGHM Cuprum we Wrocławiu, Instytut Techniki Budowlanej w Warszawie, Politechnika Śląska w Gliwicach i Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie.

Efektem projektu była Górnicza Skala Intensywności GSI-2004 (Dubiński i in., 2006b) i *Instrukcja prowadzenia powierzchniowych pomiarów sejsmometrycznych, interpretacji wyników oraz oceny i prognozowania drgań sejsmicznych wywołanych wstrząsami górniczymi w LGOM w oparciu o skalę GSI-2004.* Komisja ds. Ochrony Powierzchni przy Wyższym Urzędzie Górniczym pozytywnie zaopiniowała Instrukcję i zaleciła ją do stosowania w kopalniach LGOM oraz wskazała na potrzebę przedstawienia wyników weryfikacji instrukcji po roku jej wdrażania (uchwała WUG nr 4/2004). KGHM Polska Miedź SA przedstawiła poprawioną wersję Instrukcji, uwzględniającą zalecenia i uwagi będące wynikiem przeprowadzonych dyskusji i konsultacji z koreferentami oraz zebrane doświadczenia po roku jej wdrażania.

W roku 2011 została przeprowadzona weryfikacja skali GSI-2004 przez KGHM Cuprum, przy współpracy z Głównym Instytutem Górnictwa. W nowej skali GSI-2004/11 dokonano weryfikacji wartości granic poszczególnych stopni intensywności.

Skala GSI-2004/11 była wersją opracowaną po sześciu latach weryfikacji skali GSI-2004 (Dubiński i in., 2011). Uwzględniono w niej bogaty materiał pomiarowy i obserwacyjny pochodzący z ZG Rudna, ZG Lubin oraz ZG Polkowice-Sieroszowice.

W roku 2018 KGHM Cuprum dokonał kolejnej weryfikacji skali GSI-2004, z uwzględnieniem nowych danych obserwacyjnych (Stolecki, 2018). W zweryfikowanej skali GSI-2004/18 w porównaniu do poprzedniej wersji GSI-2004/11 wprowadzono jedynie drobne poprawki.

## 5.1.1. Górnicza Skala Intensywności Sejsmicznej GSI-2004/11

Przyjęto koncepcję oceny oddziaływań opartą na parametrze amplitudy prędkości drgań i czasu ich trwania. Było to pierwsze takie podejście do rozwiązania problemu oceny wpływu wstrząsów górniczych na powierzchnię. Skala GSI-2004 jest skalą o charakterze empirycznym, a więc przy jej tworzeniu korelowano rzeczywisty efekt oddziaływania wstrząsów z zarejestrowanymi parametrami prędkości i czasu trwania drgań.

Skala GSI-2004 pozwala na przybliżoną ocenę wpływu oddziaływania wstrząsów górniczych na budynki, w zakresie od drgań nieszkodliwych przez drgania powodujące możliwość powstania uszkodzeń elementów wykończeniowych, aż do granicy, powyżej której możliwe jest wystąpienie uszkodzeń o charakterze konstrukcyjnym.

W zależności od parametrów opisujących drgania i od warunków prowadzonej oceny oddziaływania sejsmicznego na powierzchnię, skalę GSI-2004 podzielono na trzy rodzaje:

- 1. **GSI-2004/11-V** skala oparta na parametrach: szczytowa amplituda prędkości drgań poziomych gruntu ( $PGV_{Hmax}$ ) i czas ich trwania ( $t_{Hv}$ ); stosowana do oceny intensywności drgań od wstrząsów zaistniałych i wstrząsów prognozowanych. Skala GSI-2004-V stosowana jest w LGOM jako podstawowa skala empiryczna do oceny intensywności drgań.
- GSI-2004/11-S skala oparta na parametrze pseudoprzyspieszeniowego spektrum odpowiedzi SA; stosowana do oceny intensywności drgań w przypadku wstrząsów zaistniałych i w miejscach ich rejestracji. Skala GSI-2004-S może być stosowana przez specjalistów z budownictwa jako skala pomocnicza.
- 3. **GSI-2004/11-A** skala oparta na parametrach: szczytowa amplituda przyspieszenia drgań poziomych gruntu w paśmie częstotliwości do 10 Hz ( $PGA_{H10}$ ) i czas ich trwania ( $t_{Ha}$ ); stosowana do przybliżonej oceny intensywności drgań od wstrząsów zaistniałych i wstrząsów prognozowanych. Stosowana jako skala pomocnicza.

5.1.1.1.Skala GSI-2004/11-V

Niezbędnymi parametrami do przeprowadzania oceny są maksymalna wartość wypadkowej poziomej amplitudy prędkości drgań  $PGV_{Hmax}$  – wzór (2.13) i wartość czasu trwania składowej poziomej drgań  $t_{Hv}$  – wzór (2.14).



Rys. 5.1. Skala prędkościowa GSI-2004/11-V (Dubiński i in., 2011)

Skala uwzględnia cztery stopnie intensywności sejsmicznej (rys. 5.1), dla których opisano wpływ oddziaływania wstrząsów górniczych na budynki i intensywność odczuwania drgań przez ludzi oraz użytkowania obiektów budowlanych.

## Stopień 0 (wstrząsy nieodczuwalne lub słabo odczuwalne – brak szkód)

INTENSYWNOŚĆ ODDZIAŁYWANIA DRGAŃ W BUDYNKACH:

Wstrząsy niepowodujące uszkodzeń lub szkód w budynkach. Parametry drgań od wstrząsów w budynkach są porównywalne z poziomem lokalnych drgań wywoływanych przez codzienną aktywność życiową (poruszanie się po mieszkaniu, trzaskanie drzwiami, wiercenie w ścianach itp.), a parametry drgań gruntu są porównywalne z poziomem drgań wywoływanych ruchem pojazdów mechanicznych.

## Odczuwalność drgań przez ludzi:

Znikoma/zauważalna. Wstrząsy w pojedynczych przypadkach są praktycznie nieodczuwalne przez ludzi. Wstrząsy lokalizujące się w górnej strefie stopnia 0 są słabo odczuwalne przez ludzi.

UCIĄŻLIWOŚĆ: nieodczuwalna.

## Stopień I (wstrząsy odczuwalne – brak istotnych szkód)

INTENSYWNOŚĆ ODDZIAŁYWANIA DRGAŃ W BUDYNKACH:

Na ogół wstrząsy niepowodujące uszkodzeń w budynkach. W pojedynczych przypadkach mało stabilne drobne i lekkie przedmioty, a także ozdoby mogą przewracać się (np. smukłe figurki ustawione na półkach, wysokie mało stabilne wazony itp.). Otwarte okna i drzwi mogą się zamykać. Meble mogą drgać, a przedmioty wiszące mogą kołysać się. Możliwe powiększanie się (intensyfikacja) istniejących rys, pęknięć i innych istniejących wcześniej uszkodzeń.

W starych budynkach mogą wystąpić lokalnie pojedyncze zarysowania w elementach drugorzędnych.

W budynkach prefabrykowanych może nastąpić intensyfikacja zarysowań na stykach elementów ściennych lub stropowych, np. na stykach wadliwie wykonanych okładzin z płyt gipsowo-kartonowych.

Odczuwalność drgań przez ludzi:

Zauważalna/wzbudzająca zróżnicowane reakcje. Wstrząsy mogą być odczuwalne na powierzchni, szczególnie przez ludzi znajdujących się w czasie wstrząsu na wyższych piętrach budynków.

UCIĄŻLIWOŚĆ: mała.

## Stopień II (wstrząsy silnie odczuwalne – lekkie szkody)

INTENSYWNOŚĆ ODDZIAŁYWANIA DRGAŃ W BUDYNKACH:

Całe budynki mogą drgać. Wstrząsy mogą powodować uszkodzenie elementów drugorzędnych-wykończeniowych w budynkach. Najbardziej typowe uszkodzenia to: odpadanie i zarysowanie płytek ściennych, rysy wokół ościeżnic drzwi oraz wokół okien, pęknięcia szyb, zarysowania lub spękania ścianek działowych, zarysowania bądź spękania tynku. Czasami obserwuje się uszkodzenia pokryć z dachówek i zarysowania elewacji. Mogą wystąpić szkody w mieniu ruchomym: przewracanie się drobnych, luźno stojących przedmiotów (np. książek, figurek), tłuczenie się naczyń i szklanej zastawy. Meble mogą drgać, a w pojedynczych przypadkach mogą się lekko przemieszczać.

W starych budynkach ilość uszkodzeń może istotnie wzrastać. Uszkodzeniu mogą ulec zużyte technicznie kominy (zarysowania, poluzowanie cegieł). Uszkodzone mogą zostać fragmenty pokrycia dachowego z dachówek na styku z kominami. W budynkach wykonanych w systemach uprzemysłowionych prawdopodobne są zarysowania lub ich intensyfikacja na stykach elementów prefabrykowanych.

Odczuwalność drgań przez ludzi:

Wzbudzająca niekorzystne reakcje. Wstrząsy są silnie odczuwalne przez wszystkie osoby wewnątrz i na zewnątrz budynków. Drgania o tej intensywności mogą budzić śpiących ludzi. Część osób doznaje uczucia lęku w czasie trwania drgań.

UCIĄŻLIWOŚĆ: średnia.

## Stopień III (wstrząsy wywołujące uczucie strachu – szkody w budynkach i wyposażeniu)

INTENSYWNOŚĆ ODDZIAŁYWANIA DRGAŃ W BUDYNKACH:

W strefie tej mogą pojawić się skutki opisane w stopniu II i uszkodzenia w postaci odspajania gzymsów, spadania dachówek, odspajania tynku, uszkodzenia kominów, poważniejsze uszkodzenia ścian szczytowych w budynkach murowych, zarysowania ścian działowych i nośnych w systemowym budownictwie przemysłowym i tradycyjnym. Mogą wystąpić poważniejsze szkody w mieniu: przesuwanie się lub przewracanie mebli (szczególnie smukłych meblościanek na wyższych piętrach), spadanie obrazów, spadanie większych przedmiotów (np. telewizorów).

Zawaleniu mogą ulec wiotkie ściany szczytowe i kominy. Poważnym uszkodzeniom mogą ulec ścianki kolankowe i konstrukcje więźby dachowej.

Uszkodzenia w budynkach mogą dotyczyć elementów konstrukcyjnych, istotnych dla bezpieczeństwa budynku i jego użytkowników.

Duża ilość zgłoszeń uszkodzeń (rzędu kilkudziesięciu) jest również miarą poziomu szkodliwości w III stopniu intensywności.

Odczuwalność drgań przez ludzi:

Dokuczliwa/wywołująca przestrach. Wstrząsy są bardzo silnie odczuwane przez wszystkie osoby wewnątrz i na zewnątrz budynków. Ludzie są wystraszeni i doznają dużego dyskomfortu. Niektóre osoby, szczególnie mieszkające na wyższych piętrach, wybiegają na zewnątrz budynku. UCIĄŻLIWOŚĆ: duża.

#### 5.1.1.2. Skala GSI-2004-S – skala pomocnicza

Skala GSI-2004-S może być stosowana w obszarach, w których zarejestrowano rzeczywiste przebiegi drgań w formie przyspieszenia lub prędkości drgań. Jest ona stosowana jako skala pomocnicza przeznaczona głównie dla specjalistów z zakresu budownictwa i dynamiki budowli.

Niezbędnym parametrem do przeprowadzania oceny empirycznej jest maksymalna wartość pseudoprzyspieszeniowego spektrum odpowiedzi składowych poziomych *SA* w zakresie częstotliwości od 1 do 12 Hz i okresy drgań własnych ocenianych budynków. Spektra odpowiedzi powinny być obliczane dla modelu oscylatora o jednym stopniu swobody i przy przyjęciu 5% współczynnika tłumienia.

Skala uwzględnia cztery stopnie intensywności sejsmicznej, dla których opisano wpływ oddziaływania wstrząsów w budynkach i intensywność odczuwania drgań przez ludzi oraz uciążliwość użytkowania obiektów budowlanych. Opis stopni intensywności sejsmicznej jest identyczny jak w skali GSI-2004/11-V.



Opracowana została również pomocnicza skala przyspieszeniowa GSI-2004/11-A, która w określonych warunkach może być wykorzystywana do przybliżonej oceny intensywności drgań dla wstrząsów zaistniałych i prognozowanych. Skala może być stosowana w szczególności dla obszarów, w których bezpośrednio nie rejestrowano w przeszłości rzeczywistych przebiegów wstrząsów, natomiast wyznaczono parametry drgań w formie maksymalnych amplitud przyspieszenia drgań  $PGA_{H10}$  w paśmie do 10 Hz, w oparciu o lokalne zależności empiryczne. Niezbędnymi parametrami do przeprowadzenia oceny są maksymalna amplituda przyspieszenia drgań poziomych  $PGA_{H10}$  – wzór (2.15) i wartość czasu trwania składowej poziomej przyspieszenia drgań  $t_{Ha}$  – wzór (2.16). Wskazania skali są mniej wiarygodne niż skali prędkościowej GSI-2004/11-V.

## 5.1.2. Górnicza Skala Intensywności Sejsmicznej GSI-2004/18

W roku 2018 nastąpiła kolejna weryfikacja skali GSI-2004. KGHM Cuprum we Wrocławiu przedstawił zmodyfikowaną wersję skali GSI-2004/18 (Stolecki i in., 2018). Wprowadzono drobne korekty w wersji skali prędkościowej i dokonano korekty tekstu dotyczącej uogólnionych opisów uszkodzeń w do-tychczasowej skali GSI-2004/11. Granice między stopniami intensywności sejsmicznej nie uległy zmianie. Jedynie w skali prędkościowej GSI-2004/11-V (rys. 5.1), korekcie uległy punkty załamania krzywych na osi czasu trwania drgań z 2 na 3 s i z 4 na 5 s (rys. 5.3).





## 5.1.3. Weryfikacja Górniczej Skali Intensywności Sejsmicznej GSI-2004 i GSI-2004/11

Weryfikację skali GSI-2004-V przeprowadzono z wykorzystaniem bazy wstrząsów zarejestrowanych w LGOM w latach 2004–2005, czyli w czasie ponadrocznego jej testowania (rys. 5.4). Dla badanych silniejszych wstrząsów dysponowano końcowymi protokołami z przeglądów i opisów skutków materialnych, w miejscach zarejestrowanych drgań. W takich przypadkach możliwa



była pełna weryfikacja poprawności szacowania skutków drgań według skali GSI-2004 z obserwacjami makroskopowymi. W przypadku wstrząsów słabszych nie zgłaszano wystąpienia skutków drgań w zabudowie i w ruchomościach oraz silnego odczuwania drgań przez ludzi, co również pozwoliło na weryfikację ocen interpretowanych w najniższych stopniach skali GSI-2004 (stopnie, w których potencjalnie nie powinny wystąpić żadne uszkodzenia: stopień 0 i I). Wyniki weryfikacji przedstawiono w tabeli 5.1.

Data wstrząsu	Prędkość <i>PGV<sub>II</sub></i> max mm/s	Czas trwania <i>t<sub>Hv</sub>, s</i>	Stopień intensywności wg GSI-2004	Energia sejsmiczna J	Miejsce rejestracji /skutków
19.07.05	95,7	3,65	III	1,60E+08	Trzebcz
2.09.04	40,1	8,64	II/III	1,80E+09	Trzebcz
16.05.04	20,3	17,01	II	8,40E+08	Polkowice
16.05.04	16,9	6,89	Ι	8,40E+08	Polkowice
16.05.04	19,4	13,28	Ι	8,40E+08	Polkowice
17.06.05	26,7	5,12	Ι	2,20E+08	Moskorzyn
22.02.04	45,6	1,67	Ι	1,70E+07	Trzebcz
8.03.05	17,5	1,21	Ι	6,30E+06	Trzebcz
7.04.05	15,3	1,28	Ι	2,00E+06	Trzebcz
2.07.05	19,0	1,57	Ι	3,40E+06	Trzebcz
2.07.05	18,5	3,04	Ι	1,10E+07	Trzebcz
12.08.05	25,4	2,59	Ι	1,30E+07	Trzebcz
7.02.05	17,5	4,51	Ι	1,60E+08	Polkowice
14.03.05	11,3	1,05	Ι	3,10E+06	Polkowice
19.06.05	16,3	9,06	Ι	1,60E+08	Polkowice
18.03.05	17,5	3,95	Ι	8,60E+07	Polkowice
5.08.05	17,9	5,2	Ι	6,40E+07	Polkowice
24.06.05	15,0	3,65	Ι	3,90E+06	Sucha Górna
13.07.05	14,7	5,03	Ι	1,50E+08	Sucha Górna
13.07.05	11,6	3,6	Ι	2,50E+06	Sucha Górna
24.09.05	11,7	3,95	Ι	1,60E+07	Sucha Górna

**Tabela 5.1.** Wykaz wstrząsów, które spowodowały uszkodzenia elementów niekonstrukcyjnych (stopień II i III) lub były silnie odczuwane przez mieszkańców (stopień I)

Rysunek 5.4 pokazuje, że zaproponowane granice stopni intensywności, odpowiadające konkretnym skutkom lub brakowi skutków drgań w budynkach, dobrze się wpasowują w stopnie skali GSI-2004-V. Wadą tej skali była zbyt mała liczba zdarzeń, które wywołały uszkodzenia w budynkach i tym samym nie rozdzielono w niej granicy uszkodzeń niekonstrukcyjnych w elementach wykończeniowych od uszkodzeń konstrukcyjnych.

Trzy najsilniejsze wstrząsy w skali GSI-2004-V miały stopień II lub III i tylko w tych przypadkach odnotowano i zweryfikowano w czasie przeglądu budynków wystąpienie nowych uszkodzeń. Wstrząsy w stopniu I intensywności były silnie odczuwalne, ale nie wywołały uszkodzeń w budynkach. Podobne oceny uzyskano z zastosowaniem wersji skali opartej na spektrach odpowiedzi, tj. skali GSI-2004-S. W tabeli 5.1 zestawiono wstrząsy o największej intensywności drgań w skali GSI-2004, zarejestrowane podczas weryfikacji skali w roku 2004 i 2005. Należy podkreślić, że w badanym okresie zarejestrowano również dziesiątki wstrząsów o bardzo małej intensywności drgań (stopień 0), słabo odczuwane przez mieszkańców. W tabeli 5.1 podano m.in. rejestrowane szczytowe prędkości drgań gruntu i czasy ich trwania. Zmienność rejestrowanych parametrów drgań gruntu była następująca:

- prędkość drgań PGV<sub>Hmax</sub> od 0,5 do 95,7 mm/s,
- czas trwania drgań  $t_{Hv}$  od 0,7 do 17,01 s.

Poniżej przedstawiono przykładową analizę wybranego wstrząsu, który wywołał skutki w budynkach w postaci uszkodzeń niekonstrukcyjnych (Dubiński i Mutke, 2006).

#### Wstrząs w dniu 19.07.2005 r. o energii sejsmicznej $E = 1,6.10^8$ J

Epicentrum wstrząsu znajdowało się w pobliżu Trzebcza (ognisko 100 m do najbliższej zabudowy). Był to istotny wstrząs dla weryfikacji skali GSI-2004. Wstrząs silny energetycznie, dla którego dysponuje się rzeczywistym zapisem drgań w samym Trzebczu.

## Skutki makroskopowe – stopień III.

Wstrząs spowodował uszkodzenia w kilkunastu budynkach mieszkalnych w Trzebczu. Zaistniałe szkody wystąpiły przeważnie w elementach wykończeniowych i niekonstrukcyjnych, pojedyncze w konstrukcyjnych. Polegały na miejscowym odpadaniu wyprawy tynkarskiej i malarskiej, rysach w tynkach, pęknięciu płytek glazurowych, wysuwaniu się bądź spadaniu pojedynczych dachówek. Nie otrzymano zgłoszeń od mieszkańców o uszkodzeniach w mieniu ruchomym. Nie stwierdzono i nie otrzymano zgłoszeń o awariach w uzbrojeniu podziemnym w Trzebczu. W odczuciach mieszkańców wstrząs został określony jako bardzo silny.

#### Rejestracja drgań – stopień III.

Rejestracja drgań gruntu składowych poziomych wskazała, że wstrząs wywołał w Trzebczu prędkości drgań na poziomie 95,7 mm/s, lecz o stosunkowo krótkim czasie trwania – 3,65 s. Interpretacja wstrząsu według skali GSI-2004-V wskazała, że intensywność drgań mieściła się w stopniu III (rys. 5.5).


**Rys. 5.5.** Intensywność sejsmiczna wstrząsu w dniu 19.07.2005 r. na podstawie rejestracji i wskazań skali GSI-2004-V

Stwierdzono bardzo dobrą zgodność oceny potencjalnych skutków według skali GSI-2004-V z rzeczywistymi makroskopowo zaobserwowanymi skutkami.

W kolejnym etapie weryfikacji uwzględniono kilkanaście bardzo silnych wstrząsów, które pozwoliły na zmodyfikowanie i rozbudowanie skali GSI-2004 do wersji GSI-2004/11. Materiał zbiorczy wszystkich wstrząsów zarejestrowanych w latach 2006–2010 umożliwił zweryfikowanie granicy między uszkodzeniami elementów niekonstrukcyjnych i wyposażenia mieszkań, a uszkodzeniami w elementach konstrukcyjnych. W stopniu III intensywności sejsmicznej uwzględniono lekkie uszkodzenia elementów konstrukcyjnych (rys. 5.6).



**Rys. 5.6.** Weryfikacja makroskopowo określonych stopni intensywności drgań (kolorowe punkty), z wyznaczoną z pomiarów sejsmometrycznych intensywnością zlokalizowaną w granicach zmodyfikowanej skali GSI-2004/11-V

Poniżej przedstawiono szczegółową interpretację najsilniejszego wstrząsu wybranego do weryfikacji skali za lata 2006–2010.

#### Wstrząs w dniu 21.05.2006 r. o energii sejsmicznej E = 1,9·10<sup>9</sup> J

W dniu 21.05.2006 r. miał miejsce najsilniejszy wstrząs górniczy na granicy filara ochronnego miasta Polkowice, o energii sejsmicznej  $E = 1,9.10^9$  J. Skutki makroskopowe – stopień III.

Łącznie do ZG Rudna wpłynęły 1224 zgłoszenia o powstaniu uszkodzeń w budynkach i mieniu ruchomym, w tym 1200 zgłoszeń z Polkowic, 24 z wiosek; po oględzinach uznano 995 uszkodzeń. Obserwowano skutki zarówno w elementach niekonstrukcyjnych i lekkie w elementach konstrukcyjnych obiektów budowlanych, jak i w wyposażeniu mieszkań (Minch i Samokar, 2007). Na fotografii 5.1 przedstawiono przykładowe skutki tego wstrząsu.



**Fot. 5.1.** Przykładowe skutki w Polkowicach wstrząsu w dniu 21.05.2006 r., o energii sejsmicznej  $E = 1,9 \cdot 10^9$  J (fot. Z. Samokar)

Rejestracja drgań – stopień III

Rejestracje na stanowiskach pomiarowych przy ul. Miedzianej, Hubala i Akacjowej zakwalifikowały ten wstrząs do stopnia III w skali GSI-2004/11-V. Na rysunkach 5.7–5.9 przedstawiono interpretację wstrząsu zarejestrowanego na stanowisku Miedziana w Polkowicach.

Czas trwania składowych poziomych drgań wynosił  $t_{Hv}$  = 5,33 s, natomiast wypadkowa szczytowa amplituda prędkości drgań wynosiła  $PGV_{Hmax}$  = 101 mm/s dla stanowiska Miedziana. Te parametry kryterialne kwalifikują wstrząs o energii sejsmicznej E = 1,9·10<sup>9</sup>, który wystąpił w dniu 21.05.2006 r., do stopnia III intensywności sejsmicznej. Wystąpiła duża zgodność między obserwacjami makrosejsmicznymi skutków drgań, a stopniem intensywności wyznaczonym z pomiarów sejsmometrycznych.

Na pozostałych stanowiskach pomiarowych wstrząs ten został zakwalifikowany do stopnia II intensywności według skali GSI-2004/11-V, co odpowiadało obserwowanym skutkom w budynkach zlokalizowanych w pobliżu tych stanowisk.



**Rys. 5.7.** Sejsmogram prędkościowy drgań gruntu na stanowisku Miedziana w Polkowicach dla wstrząsu w dniu 21.05.2006 r. o energii sejsmicznej  $E = 1,9 \cdot 10^9$  J



**Rys. 5.8.** Interpretacja wstrząsu w dniu 21.05.2006 r. o energii sejsmicznej  $E = 1,9 \cdot 10^9$  J zarejestrowanego na stanowisku sejsmometrycznym Miedziana w Połkowicach według skali prędkościowej GSI-2004/11-V



**Rys. 5.9.** Interpretacja wstrząsu w dniu 21.05.2006 r. o energii sejsmicznej  $E = 1,9 \cdot 10^9$  J zarejestrowanego na stanowisku sejsmometrycznym Miedziana w Polkowicach według skali spektralnej GSI-2004/11-S

#### 5.2. Górnicze skale intensywności sejsmicznej dla wstrząsów indukowanych eksploatacją pokładów węgla w GZW i LZW

W rozdziale 4 wspomniano, że ze względu na wysoką sejsmiczność w intensywnie zurbanizowanym obszarze Górnego Śląska i odmienną charakterystykę drgań i zabudowy powierzchniowej, skala GSI-2004 nie w pełni spełniała procedury weryfikacji dla tego terenu. Podjęto więc działania mające na celu opracowanie takiej skali dla sejsmiczności indukowanej eksploatacja pokładów węgla w GZW. Inicjatorem tych działań była ówczesna Kompania Węglowa SA (KW SA), która w roku 2006 zleciła Głównemu Instytutowi Górnictwa w Katowicach opracowanie odpowiedniej skali oceny oddziaływania drgań na powierzchnię. Wynikiem dwuletnich badań było opracowanie w roku 2008 skali GSIGZWKW (Dubiński i Mutke, 2007; Barański i Mutke, 2008; Dubiński i in., 2009a). Do oceny stopni intensywności sejsmicznej w skali GSI<sub>GZWKW</sub> wykorzystano dwuparametryczne kryterium oparte na szczytowej amplitudzie poziomej prędkości drgań (alternatywnie w skali pomocniczej: szczytowej amplitudzie poziomego przyspieszenia drgań) i czas trwania głównej fazy drgań. Po czterech latach jej stosowania i zebraniu nowych danych pomiarowych oraz obserwacyjnych, dokonano znaczącej modyfikacji skali (Mutke i in., 2012). Należy podkreślić, że bardzo dobry materiał do weryfikacji uzyskano dzięki zainstalowaniu aparatury sejsmometrycznej w kopalniach KW SA. Nowa skala po weryfikacji została oznaczona symbolem GSI<sub>GZWKW</sub>-2012 (Dubiński i Mutke,

2012; Barański i in., 2014) i zaopiniowana przez Komisję ds. Ochrony Powierzchni przy Wyższym Urzędzie Górniczym i zalecona do stosowania w zakładach górniczych Kompanii Węglowej SA.

Następnym etapem rozwoju górniczych skal intensywności była realizacja międzynarodowego projektu badawczego. W ramach projektu europejskiego finansowanego przez Fundusz Badawczy Węgla i Stali (RFCS) o akronimie COMEX opracowano skalę MSIIS-15 Mining Seismic Instrumental Intensity Scale (Mutke i in., 2015a; Kotyrba i Mutke, 2015). W skali tej wykorzystano dane nie tylko z kopalń polskich, ale również z kopalń niemieckich i czeskich (Sroka, 2006; Pohl i Sroka, 2006; Alber i Fritschen, 2011; Holecko i Mutke, 2012). Skala ta jest rozwinięciem skali GSIGZWKW-2012 i została rozszerzona o dodatkowy stopień intensywności związany z wysokimi parametrami prędkości drgań z kopalń niemieckich, czeskich i polskich (z lat 2012–2013). W latach 2014– 2016 w GZW wystąpiło kilkanaście bardzo silnych górniczych wstrząsów sejsmicznych (wstrząsy o energii sejsmicznej przekraczającej 10<sup>8</sup> J i o amplitudach predkości drgań PGV > 0.05 m/s i przyspieszeniu PGA > 1.0 m/s<sup>2</sup>), zarejestrowanych przez aparaturę zainstalowaną na powierzchni GZW. Zarejestrowane wartości amplitud drgań przekraczały wartości wykorzystywane dotychczas do weryfikacji skali GSI. W prowadzonej bazie danych znalazły się również rejestracje wstrząsów sejsmicznych z obszaru LZW Bogdanka. W Głównym Instytucie Górnictwa w ramach działalności statutowej pn. Górnicza Skala Intensywności Sejsmicznej GSIS-2017 dla oceny skutków drgań wywołanych w środowisku powierzchniowym zjawiskami sejsmicznymi indukowanymi eksploatacją wegla kamiennego, opracowano nową wersję skali GSI o symbolu GSIS-2017 (Mutke i in., 2017a). Nowa skala uwzględniała dodatkowy stopień intensywności i rozróżniała skutki wstrząsu w zależności od typu budynku i jego stanu technicznego. W zależności od skutków wstrzasu przypisanych poszczególnym stopniom intensywności drgań w skali GSIS-2017 wyróżniono poziomy (stany) odporności dynamicznej budynków (Mutke i in., 2018b). Skalę GSIS-2017 można już stosować we wszystkich zagłębiach weglowych w Polsce.

Na posiedzeniu Komisji ds. Ochrony Powierzchni przy Wyższym Urzędzie Górniczym w Katowicach w dniu 19.01.2018 r. podjęto Uchwałę nr 1/2018, w której Komisja pozytywnie zaopiniowała Zasady stosowania Górniczej Skali Intensywności Sejsmicznej GSIS-2017 do prognozy i oceny skutków oddziaływania wstrząsów indukowanych eksploatacją na obiekty budowlane oraz klasyfikacji ich odporności dynamicznej i zaleciła ich stosowanie w kopalniach węgla kamiennego.

#### 5.2.1. Górnicza Skala Intensywności Sejsmicznej GSIS-2017

Górnicza Skala Intensywności Sejsmicznej GSIS-2017 jest skalą empiryczno-pomiarową i pozwala na przybliżoną ocenę wpływu oddziaływania wstrząsów górniczych na budynki, w zakresie od drgań nieszkodliwych, przez drgania powodujące uszkodzenie elementów wykończeniowych, aż do wystąpienia uszkodzeń konstrukcji budynku. Umożliwia również ocenę uciążliwości użytkowania obiektów budowlanych zlokalizowanych na terenie występowania wstrząsów górniczych i ocenę odczuwalności wstrząsów przez ludzi.

Stopnie intensywności sejsmicznej skali GSIS-2017 przedstawione są na odpowiednich wykresach lub w tabelach, w funkcji parametrów drgań na powierzchni terenu  $PGV_{Hmax}$  i  $t_{Hv}$  (i/lub  $PGA_{H10}$  i  $t_{Ha}$ ). W najwyższych stopniach intensywności dodatkowo wykorzystuje się częstotliwość głównej fazy drgań. Weryfikacji skali dokonano w oparciu o posiadaną bazę górniczych wstrząsów sejsmicznych, które wystąpiły w obszarze zagłębia górnośląskiego i lubelskiego oraz uzupełniająco bazę wstrząsów zaistniałych w niemieckich i czeskich zagłębiach górniczych.

Skala GSIS-2017 uwzględnia następujące typy budynków:

- budynki o konstrukcji tradycyjnej i tradycyjnej-ulepszonej, czyli ogólnie budynki murowane z cegły lub innych elementów drobnowymiarowych, posiadające ścianowe układy nośne,
- budynki ścianowe o konstrukcji betonowej i/lub żelbetowej,
- budynki szkieletowe o konstrukcji żelbetowej lub stalowej.

Ponadto w skali uwzględniono:

- skutki oddziaływania drgań na budynki w złym stanie technicznym,
- skutki oddziaływania drgań na wrażliwe budowle zabytkowe o znaczeniu historycznym,
- kryteria empirycznej oceny odporności dynamicznej budynków poddanych oddziaływaniom sejsmicznym pochodzenia górniczego, opracowane z wykorzystaniem skali GSIS-2017.

Drgania przypisane do określonego stopnia intensywności mogą – lecz nie muszą – wywołać skutki przypisane danemu stopniowi skali.

F	funkcja przejścia drgań z podłoża gruntowego na fundament, wyrażona jako iloraz bezwzględnych spektrów odpowiedzi dla rejestracji w gruncie i na fundamencie w paśmie częstotliwości do 10 Hz
Α	amplituda drgań obliczona z zarejestrowanego przebiegu czasowego
Arz	amplituda rzeczywistych drgań na wejściu kanału pomiarowego
f	częstotliwość drgań
$f_o$	pierwsza harmoniczna częstotliwość drgań własnych budynków
Re	odległość epicentralna (odległość od epicentrum wstrząsu)
$R_h$	odległość hipocentralna (odległość od hipocentrum wstrząsu)
t <sub>Hv</sub>	czas trwania składowych poziomych prędkości drgań gruntu na sejsmogramie, wyznaczony między tymi momentami czasowymi, kiedy intensywność określona za pomocą wzoru (2.15) osiąga 5% i 95% swojej maksymalnej wartości
tнa	czas trwania składowych poziomych przyspieszenia drgań gruntu na akcelerogramie, wyznaczony między tymi momentami czasowymi, kiedy intensywność określona za pomocą wzoru (2.16) osiąga 5% i 95% swojej maksymalnej wartości
$a_{x10}(t), a_{y10}(t)$	akcelerogram przyspieszenia drgań gruntu zarejestrowany na składowej poziomej x lub y, po filtracji w paśmie do 10 Hz
$E_s$	energia sejsmiczna wstrząsu
PGA	amplituda pikowego przyspieszenia drgań
PGA <sub>H10</sub>	maksymalne przyspieszenie drgań poziomych w paśmie częstotliwości do 10 Hz, wyznaczone jako poziome maksimum długości wektora drgań gruntu
PGV	amplituda pikowej prędkości drgań
PGV <sub>Hmax</sub>	maksymalna prędkość drgań poziomych, wyznaczona jako poziome maksimum długości wektora drgań gruntu, określona za pomocą wzoru (2.13)
PGVz	amplituda pikowej prędkości drgań składowej pionowej
$v_x(t), v_y(t)$	sejsmogram prędkości drgań gruntu zarejestrowany na składowej poziomej x lub y
Vs	prędkość rozchodzenia się fali sejsmicznej poprzecznej
W <sub>f</sub>	amplifikacja drgań (współczynnik określający wzmocnienie lub tłumienie drgań przez nadkład geologiczny)
$x_{o}, y_{o}, z_{o}$	współrzędne hipocentrum wstrząsu
Wstrząsy eksploatacyjne	zjawiska sejsmiczne indukowane wyłącznie prowadzoną eksploatacją węgla i spowodowa- nymi nią zmianami stanu naprężeniowo-deformacyjnego w otaczającym masywie skalnym
Wstrząsy regionalne (tektoniczne)	zjawiska sejsmiczne związane z relaksacją naturalnych naprężeń w strefach regionalnej tektoniki, dla których eksploatacja górnicza i związane z nią lokalne pole naprężeń jest jedynie elementem uruchamiającym lub przyspieszającym uruchomienie tego procesu
Pomiarowa intensywność sejsmiczna (I <sub>GSIS</sub> )	wielkość charakteryzowana przez parametry <i>PGV<sub>Hmax</sub></i> i <i>t<sub>Hv</sub></i> (tzw. skala prędkościowa) lub przez parametry <i>PGA<sub>H10</sub></i> i <i>t<sub>Ha</sub></i> (tzw. skala przyspieszeniowa); wyrażona w skali siedmiostopniowej (od stopnia 0 do stopnia VI)
Stopień szkodliwości drgań (S)	opis skutków drgań na podstawie obserwacji makrosejsmicznych w budynkach, w liniowych obiektach infrastruktury podziemnej i odczuwalności wstrząsów przez ludzi oraz oceny poziomu uciążliwości użytkowania obiektów budowlanych
Budynek	budynki o wysokości nieprzekraczającej 12 kondygnacji, w tym: • budynki o konstrukcji tradycyjnej i tradycyjnej-ulepszonej, czyli ogólnie budynki murowane z cegły lub innych elementów drobnowymiarowych, posiadające ścianowe układy nośne • budynki ścianowe o konstrukcji betonowej i/lub żelbetowej • budynki szkieletowe o konstrukcji żelbetowej lub stalowej

#### Tabela 5.2. Symbole i definicje stosowane w GSIS-2017

	Budynek w złym stanie technicznym	<ul> <li>budynek, w którym występuje przynajmniej jedna z poniższych cech:</li> <li>przekroczenie wytrzymałości pojedynczych elementów nośnych, co oznacza pojawienie się pęknięć ścian, nadproży i stropów oraz połączeń elementów nośnych</li> <li>pęknięcie ścian o rozwartości przekraczającej 5 mm i lokalne zniszczenia fragmentów murów i innych pojedynczych elementów budynku</li> <li>obluzowanie belek stropowych</li> <li>duże deformacje bryły budynku</li> <li>duże naturalne zużycie materiałów konstrukcyjnych, przejawiające się rozległą i zaawansowaną erozją murów ścian konstrukcyjnych budynku oraz rozległą i zaawansowaną korozją zbrojenia i betonu w żelbetowych elementach konstrukcyjnych budynku</li> </ul>
	Elementy konstrukcyjne budynku	elementy ustroju nośnego budynku – elementy konstrukcji przenoszące główne obciążenia pionowe budynku elementy ustroju usztywniającego budynku – elementy konstrukcji przenoszące główne obciążenia poziome budynku część elementów ustroju nośnego budynku jest jednocześnie elementami ustroju usztywnia- jącego budynku
	Elementy niekonstrukcyjne budynku	elementy wypełniające budynku – elementy budowlane służące rozplanowaniu przestrzen- nemu budynku, czyli niekonstrukcyjne ściany zewnętrzne (ściany osłonowe) i niekonstruk- cyjne ściany wewnętrzne (ściany działowe) budynku elementy wykończeniowe budynku – elementy budowlane służące polepszeniu wyglądu i komfortu użytkowania budynku, takie jak: okładziny elewacyjne, tynki i gładzie ścienne oraz sufitowe, powłoki malarskie, wykładziny ścienne, sufitowe i podłogowe, wykonane z płytek ceramicznych, wykładzin i innych okładzin, sufity podwieszane, stolarka okienna i drzwiowa oraz pokrycie dachowe elementy wyposażeniowe budynku – czyli urządzenia i instalacje techniczne zainstalowane w budynku, w tym instalacje dźwigowe, instalacje poszczególnych mediów oraz elementy umożliwiające i wspomagające korzystanie z tych mediów
	Rysa, zarysowanie	uszkodzenie powierzchniowe o niewielkiej rozwartości
ĺ	Pęknięcie	uszkodzenie o niewielkiej rozwartości na całą głębokość elementu (na wskroś – do 5 mm)
ĺ	Szczelina	uszkodzenie o dużej rozwartości na całą głębokość elementu (na wskroś – powyżej 5 mm)
	Liniowe obiekty infrastruktury podziemnej	podziemne sieci wodociągowe, gazowe, kanalizacyjne lub inne (np. tunele)
	Uciążliwość	uciążliwość użytkowania obiektów budowlanych na terenie występowania wstrząsów górniczych według tabeli 5.3

# **Tabela 5.3.** Poziomy uciążliwości użytkowania obiektów budowlanych (zmodyfikowana wersja z Instrukcji nr 12 Głównego Instytutu Górnictwa – Kwiatek i in., 2000)

Uciążliwość	Zakłócenie normalnego użytkowania	Odczuwalność skutków eksploatacji przez ludzi	Naprawianie szkód
Nieodczuwalna	praktycznie nie występuje	znikoma	nie występują skutki wymagające usuwania
Mała	nieistotne	zauważalna	w ramach okresowych remontów
Średnia	utrudniające użytkowanie	wzbudzająca niekorzystne reakcje (zaniepokojenie)	po zakończeniu eksploatacji górniczej lub w uzgodnieniu z użytkownikami
Duża	mogą wystąpić przerwy w użytkowaniu	dokuczliwa	zachodzi potrzeba bieżących interwencji
Nieakceptowalna	wyłączenie z użytkowania na dłuższy okres	zagrażająca zdrowiu	konieczność natychmiastowej interwencji

#### 5.2.1.1. Stopnie pomiarowej intensywności sejsmicznej w skali GSIS-2017

Parametrami niezbędnymi do wyznaczania stopni pomiarowej intensywności sejsmicznej są maksymalna wartość wypadkowej amplitudy prędkości drgań poziomych  $PGV_{Hmax}$  i wartość czasu trwania składowej poziomej drgań  $t_{Hv}$ oraz uzupełniająco częstotliwość głównej fazy drgań dla wyższych stopni intensywności. Parametry te można wyznaczyć z wykorzystaniem:

- rzeczywistych przebiegów drgań w miejscach rejestracji,
- estymowanych wartości parametrów drgań podłoża, obliczonych za pomocą empirycznego równania regresji.

Skala jest siedmiostopniowa – od stopnia 0 do stopnia VI pomiarowej intensywności sejsmicznej (rys. 5.10a, b), dla których opisano zaobserwowane skutki oddziaływania wstrząsów górniczych w budynkach i liniowych obiektach infrastruktury podziemnej oraz intensywność odczuwania drgań przez ludzi i uciążliwość użytkowania obiektów budowlanych. Należy zauważyć, że stopień V intensywności jest od góry ograniczony dotychczasowymi doświadczeniami pomiarowymi z zagłębi europejskich.

Wstrząsy charakteryzujące się drganiami krótkotrwałymi do 1,5 s wykazują wyższy stopień pomiarowej intensywności sejsmicznej  $I_{GSIS}$  niż wskazują obserwacje makrosejsmiczne ich skutków w budynkach.

Na rysunku 5.10a przedstawiono skalę GSIS-2017 w wersji prędkościowej – jest to podstawowa skala do stosowania.



**Rys. 5.10a.** Stopnie intensywności sejsmicznej dla wstrząsów górniczych według skali GSIS-2017 w wersji prędkości drgań powierzchni

Na rysunku 5.10b przedstawiono skalę GSIS-2017 w wersji przyspieszenia drgań na osi pionowej. Należy wziąć pod uwagę, że korelacja obserwowanych skutków drgań (stopni szkodliwości w poszczególnych stopniach intensywności sejsmicznej) jest lepsza dla prędkości drgań  $PGV_{Hmax}$  niż dla przyspieszenia drgań  $PGA_{H10}$ . Do wyznaczania stopni intensywności sejsmicznej zaleca się wykorzystywanie parametru  $PGV_{Hmax}$  jako parametru podstawowego i bardziej wiarygodnego, szczególnie do dokonywania oceny uszkodzenia elementów niekonstrukcyjnych.



**Rys. 5.10b.** Stopnie intensywności sejsmicznej dla wstrząsów górniczych według skali GSIS-2017 w wersji przyspieszenia drgań powierzchni

Oceny szkodliwości drgań należy dokonywać w zależności o typu konstrukcji budynku i jego stanu technicznego przedstawionych poniżej.

**Budynki o konstrukcji tradycyjnej i tradycyjnej-ulepszonej**, czyli ogólnie budynki murowane z cegły lub innych elementów drobnowymiarowych, posiadające ścianowe układy nośne. Ta grupa budynków jest najlepiej zweryfikowana empirycznie. Syntetyczny opis skutków, wyrażony stopniami szkodliwości drgań dla poszczególnych stopni intensywności sejsmicznej i określonych parametrów drgań powierzchni, przedstawiono w tabeli 5.4.

**Budynki ścianowe o konstrukcji betonowej i żelbetowej** charakteryzują się wyższą odpornością na wstrząsy górnicze niż budynki o konstrukcji tradycyjnej i tradycyjnej-ulepszonej, dlatego też występujące w nich skutki wstrząsów można określić jako odpowiadające skutkom wstrząsów o intensywności o jeden stopień niższej niż wynikająca z zarejestrowanych (prognozowanych) parametrów drgań (nie dotyczy to stopnia 0 intensywności).

**Tabela 5.4.** Syntetyczny opis potencjalnych skutków drgań dla poszczególnych stopni intensywności sejsmicznej w skali GSIS-2017 dla budynków w zabudowie tradycyjnej i tradycyjnej-ulepszonej w dobrym stanie technicznym

_								
		S	SI	S <sub>II</sub>	SIII	Siv	Sv	Svi
wości drgań w poszczególnych stopniach intensywności)	potencjalne uszkodzenia budynków i przypisane im stopnie szkodliwości drgań (S)	nie powodują żadnych szkód	nie powodują żadnych szkód	intensyfikacja istniejących rys lub pęknięć	pierwsze nowe uszkodzenia elementów niekonstrukcyjnych	pierwsze uszkodzenia niektórych elementów ustroju konstrukcyjnego (nośnego lub usztywniającego) niezagrażające jednak stateczności budynku oraz niepowodujące obniżenia odporności dynamicznej budynku; liczne nowe uszkodzenia elementów niekonstrukcyjnych budynku	uszkodzenia elementów ustroju konstrukcyjnego (nośnego lub usztywniającego) zmniejszające znacząco odporność dynamiczną budynku, lecz niezagrażające jeszcze stateczności obiektu; silne uszkodzenia elementów niekonstrukcyjnych budynku, w tym spadanie dachówek oraz cegieł ze ściętych kominów zewnętrznych; drgania szczególnie groźne w zakresie górnych wartości stopnia V i niskiej częstotliwości głównej fazy drgań poziomych, $f < 5$ Hz	silne uszkodzenia elementów ustroju konstrukcyjnego budynku (nośnego lub usztywniającego) mogące powodować utratę stateczności obiektu; żaden z dotychczas zaistniałych wstrząsów górniczych na obszarze GZW nie spowodował takich następstw, ajakkolwick nie można ich całkowicie wykluczyć, w przypadku dalszego wzrostu intensywności drgań powierzchni terenu w wyniku wstrząsów górniczych (zdarzenia takie obserwowano w innych zagłębiach górniczych) (zdarzenia takie obserwowano w innych w zakreje niskich czestołtiwości głównej fazy drgań f < 5 Hz)
Opis skutków (stopni szkodli	odczuwalność drgań	nieodczuwalne przez ludzi bądź słabo odczuwalne	odczuwalne przez ludzi wewnątrz budynków, słabo przez ludzi na zewnątrz, kołysanie się wiszących przedmiotów	wewnątrz budynków drgania są bardzo mocno odczuwalne, cały budynek lekko kołysze się	silnie odczuwalne przez większość ludzi na zewnątrz i wewnątrz budynków, meble mogą się przesuwać, cały budynek kołysze się	bardzo silnie odczuwalne przez wszystkich ludzi, ludzie są mocno wystraszeni, wielu wystraszonych wybiega na zewnątrz; niektórzy tracą równowagę, szczególnie na wyższych piętrach; drobne przedmioty spadają z półek	bardzo silne i dokuczliwe odczuwanie drgań; w górnej granicy intensywności drgań ludzie mają problem z utrzymaniem równowagi; duże przedmioty spadają z półek i stolików	ogólny strach i panika; przewracanie i przesuwanie się ciężkich przedmiotów, np. mebli, niezamocowanych telewizorów
	czas t ≥ 3,0 s	≤ 0,005	0,005-0,01	0,01-0,025	0,025-0,04	0,04-0,06	0,06–0,1	> 0,1
PGVmm, m/s	czas 1,5-3,0 s	s 0,005	0,005-0,02 0,005-0,01	0,02-0,035	0,035-0,05 0,025-0,04	0,05-0,07	0,05-0,11	> 0,11 > 0,1
	czas t ≤ 1,5 s	s 0,005	0,005-0,02	0,02-0,035	0,035-0,05	0,05-0,07	0,07-0,11	> 0,11
Stopień	pomiarowej intensywności sejsmicznej, I <sub>cze</sub>	6 Slabo zauważalne	Odczuwalne	II Intensyfikacja uszkodzeń	Uszkodzenia niekonstrukcyjne	12 Lekkie uszkodzenia konstrukcyjne	V Uszkodzenia konstrukcyjne	VI Pierwsze zniszczenia Stopień niezweryfikowany pomiarowo

**Budynki szkieletowe o konstrukcji żelbetowej lub stalowej** posiadające słupowo-belkowe układy nośne, charakteryzują się podobną odpornością co budynki o konstrukcji tradycyjnej i tradycyjnej-ulepszonej. Dla tych budynków można stosować bezpośrednio ocenę skutków wstrząsów według tabeli 5.4.

**Budynki w złym stanie technicznym** charakteryzują się zazwyczaj niższą odpornością dynamiczną niż budynki w dobrym stanie technicznym. Na podstawie dotychczasowych doświadczeń można przyjmować, że drgania wywołują w nich skutki charakterystyczne dla intensywności o jeden stopień wyższej niż wynikające z zarejestrowanych parametrów drgań. Przykładowo, przy drganiach zaliczonych do stopnia III intensywności można się spodziewać wystąpienia skutków charakterystycznych dla stopnia IV intensywności drgań (opisanych w tab. 5.4).

**Budynki historyczne i zabytkowe o dużej wrażliwości na drgania** – wstrząsy o stopniu 0 intensywności sejsmicznej nie są szkodliwe dla budynków zabytkowych i historycznych o dużej wrażliwości na drgania w przypadku oddziaływania pojedynczych zdarzeń sejsmicznych (liczba zdarzeń sejsmicznych < 100 w ciągu jednego roku). W przypadku wielokrotnego powtarzania się wstrząsów w stopniu 0 (liczba zjawisk sejsmicznych > 100 w ciągu roku), pierwsze szkodliwe wpływy mogą wystąpić po przekroczeniu drgań *PGV*<sub>Hmax</sub> = 3 mm/s.

Na rysunku 5.11 przedstawiono syntetyczny opis potencjalnych skutków drgań dla poszczególnych stopni intensywności sejsmicznej w skali GSIS-2017 dla budynków w zabudowie tradycyjnej i tradycyjnej-ulepszonej w dobrym stanie technicznym.



**Rys. 5.11.** Opis syntetyczny potencjalnych skutków drgań dla poszczególnych stopni intensywności sejsmicznej w skali GSIS-2017 dla budynków w zabudowie tradycyjnej i tradycyjnej-ulepszonej w dobrym stanie technicznym, przedstawiony na podkładzie graficznym

Skutki drgań wyrażone stopniem szkodliwości *S*, przypisane do stopni pomiarowej intensywności sejsmicznej  $I_{GSIS}$ , są różne dla różnych konstrukcji budynków i ich stanu technicznego (tab. 5.5).

**Tabela 5.5.** Powiązanie stopni intensywności sejsmicznej ze stopniami szkodliwości drgań w zależności od typu konstrukcji budynku i jego stanu technicznego

Stopień intensywności drgań	Budynki o konstrukcji tradycyjnej i tradycyjnej- -ulepszonej	Budynki ścianowe o konstrukcji betonowej i/lub żelbetowej	Budynki szkieletowe o konstrukcji żelbetowej lub stalowej	Budynki w złym stanie technicznym		
<b>J</b> GSIS	IGSIS Budynki w dobrym stanie technicznym					
	Stopnie szkodliwo	ści odpowiadające stop	niom intensywności			
0	$S_0$	C-	$S_0$	$S_{\rm I}$		
Ι	Sı	50	Sı	SII		
II	$S_{\rm II}$	SI	$S_{\rm II}$	$S_{\rm III}$		
III	SIII	SII	SIII	Siv		
IV	Siv	SIII	Siv	Sv		
V	Sv	Siv	Sv	Svi		
VI	Svi	Sv	Svi	Svi		

Do dokonywania oceny możliwych skutków drgań z wykorzystaniem skali GSIS-2017 niezbędny jest pełny opis stopni intensywności. Poniżej przedstawiono przykładowy opis według skali GSIS-2017 dla budynków w zabudowie tradycyjnej i tradycyjnej-ulepszonej w dobrym stanie technicznym, powszechnie spotykanej na terenach górniczych GZW.

## Pełny opis skutków drgań w poszczególnych stopniach intensywności sejsmicznej skali GSIS-2017 (dla budynków w zabudowie tradycyjnej i tradycyjnej-ulepszonej w dobrym stanie technicznym)

## **STOPIEŃ 0 (słabo odczuwalne, nieszkodliwe dla obiektów budowlanych)** Oddziaływanie drgań na budynki:

- Drgania nieszkodliwe dla wszystkich elementów konstrukcyjnych i niekonstrukcyjnych budynków.
- Drgania niepowodujące powiększania się uszkodzeń istniejących w budynkach.

ODCZUWALNOŚĆ DRGAŃ PRZEZ LUDZI: znikoma/słaba.

Wstrząsy lokalizujące się w dolnej części stopnia 0 (drgania do 0,001 m/s) są praktycznie nieodczuwalne przez ludzi i rejestrowane tylko przez sejsmometry. Wstrząsy lokalizujące się w górnej strefie stopnia 0 są słabo odczuwalne przez ludzi znajdujących się w budynkach. Parametry drgań od wstrząsów w budynkach są porównywalne z poziomem lokalnych drgań wywoływanych przez codzienną aktywność życiową (poruszanie się po mieszkaniu, zamykanie drzwi, wiercenie w ścianach itp.), a parametry drgań gruntu są porównywalne z poziomem drgań wywoływanych ruchem pojazdów. Dla silnych wstrząsów z dużej odległości epicentralnej odczucia przypominają lekkie kołysanie w kierunku poziomym.

UCIĄŻLIWOŚĆ: nieodczuwalna.

#### STOPIEŃ I (odczuwalne, brak uszkodzeń w obiektach budowlanych)

Oddziaływanie drgań na budynki:

• Drgania nieszkodliwe dla wszystkich elementów konstrukcyjnych i niekonstrukcyjnych budynków.

Odczuwalność drgań przez ludzi: słaba.

Drgania wywołane wstrząsami w strefie epicentralnej (pod budynkiem) są odczuwalne w budynku jak uderzenie od spodu. Drgania wywołane silnymi wstrząsami zlokalizowanymi w dalszej odległości od budynku, wywołują lekkie kołysanie całego budynku.

Wstrząsy mogą być odczuwalne przez ludzi znajdujących się w czasie wstrząsu w budynkach na wyższych piętrach. Niektórzy ludzie budzą się, jeśli wstrząs wystąpi w nocy.

Talerze i naczynia mogą drgać i brzęczeć. Wiszące przedmioty mogą kołysać się. Otwarte okna i drzwi mogą się same zamykać.

Niewielu ludzi znajdujących się na zewnątrz budynku odczuwa wstrząs. UCIĄŻLIWOŚĆ: mała.

#### STOPIEŃ II (intensyfikacja istniejących uszkodzeń)

Oddziaływanie drgań na budynki:

- Drgania nieszkodliwe dla wszystkich elementów konstrukcyjnych i nieuszkodzonych elementów niekonstrukcyjnych budynków.
- Drgania (szczególnie w górnym zakresie stopnia II) w pojedynczych przypadkach mogą powodować nieznaczne powiększanie się (przyrost) uszkodzeń elementów niekonstrukcyjnych już istniejących w budynkach, tj.
  - wydłużenie zarysowań i pęknięć,
  - odpadanie niewielkich fragmentów odspojonych tynków wewnętrznych i zewnętrznych,
  - odspajanie słabo przyklejonych płytek ceramicznych,
  - odpadanie fragmentów uszkodzonych gzymsów i słabo umocowanych sterczyn,
  - intensywniejsze poluzowania cegieł kominów murowych,

- intensywniejsze poluzowania dachówek do ich obsuwania się włącznie,
- intensyfikację zarysowań na stykach elementów konstrukcyjnych (np. ściana-strop w budynkach prefabrykowanych), zwłaszcza wykonanych z różnych materiałów budowlanych,
- intensyfikację zarysowań na stykach wadliwie wykonanych okładzin z płyt gipsowo-kartonowych.

ODCZUWALNOŚĆ DRGAŃ PRZEZ LUDZI: średnia.

Wstrząsy mogą być silnie odczuwane na powierzchni zarówno w budynkach, jak i na zewnątrz. Wielu ludzi budzi się, jeśli wstrząs wystąpi w nocy. Talerze i zastawy szklane mogą drgać, brzęczeć, a czasami potłuc się. Wiszące przedmioty silnie kołyszą się. Meble mogą drgać, a czasami przesuwać się. Otwarte okna i drzwi mogą same zamykać się. W strefie epicentralnej może być odczuwalne silne uderzenie od dołu. Słyszalny jest efekt trzeszczenia ścian. UCIĄŻLIWOŚĆ: średnia.

## STOPIEŃ III (uszkodzenia elementów niekonstrukcyjnych)

Oddziaływanie drgań na budynki (budynki w dobrym stanie technicznym):

- Drgania nieszkodliwe dla wszystkich elementów konstrukcyjnych budynków.
- Drgania mogą powodować dalsze zwiększanie istniejących uszkodzeń elementów niekonstrukcyjnych – opisane w stopniu II intensywności.
- Drgania mogą powodować pierwsze uszkodzenia elementów niekonstrukcyjnych, tj.
  - zarysowania i/lub odspojenia tynków zewnętrznych i wewnętrznych,
  - zarysowania ścian działowych,
  - zarysowania w narożnikach ścian i fasetach,
  - zarysowania płytek ceramicznych,
  - zarysowania wokół ościeżnic drzwi i okien,
  - zarysowania na stykach elementów, zwłaszcza wykonanych z różnych materiałów budowlanych,
  - pęknięcia i odpadanie fragmentów prawidłowo zamocowanych gzymsów i innych sterczyn,
  - poluzowanie cegieł kominów murowanych, w niektórych przypadkach ich pęknięcia i odpadanie tynków,
  - poluzowanie i obsuwanie się pojedynczych dachówek.

Mogą wystąpić drobne szkody w mieniu – stłuczenie: naczyń, szklanej zastawy, smukłych i luźno stojących przedmiotów. ODCZUWALNOŚĆ DRGAŃ PRZEZ LUDZI: silna.

W epicentrum wstrząsu drgania odczuwane są jak bardzo silne uderzenie w budynek od spodu. Ściany trzeszczą, a meble mogą przemieszczać się lub kołysać. Na wyższych piętrach odczuwa się kołysanie, szczególnie silne przy dłuższym czasie trwania drgań (t > 3 s).

Wstrząsy są silnie odczuwane przez wszystkie osoby wewnątrz i na zewnątrz budynków. Drgania o tej intensywności budzą śpiących ludzi. Część osób doznaje uczucia strachu w czasie trwania drgań. Z otwartych naczyń może wylewać się płyn.

UCIĄŻLIWOŚĆ: średnia.

#### STOPIEŃ IV (lekkie uszkodzenia elementów konstrukcyjnych)

Oddziaływanie drgań na budynki:

Drgania mogą powodować pierwsze uszkodzenia niektórych elementów ustroju konstrukcyjnego (nośnego lub usztywniającego) budynków, nie zagrażają jednak ich stateczności, a w szczególności:

- ukośne i pionowe zarysowania i pęknięcia ścian nośnych,
- zarysowania i pęknięcia stropów,
- zarysowania i pęknięcia samonośnych konstrukcji kominowych,
- zarysowania lub pęknięcia ścian zewnętrznych na przedłużeniu otworów okiennych,
- pierwsze rozluźnienia cegieł nadproży ceglanych i obrysowania nadproży żelbetowych,
- niewielkie zarysowania i pęknięcia filarków międzyokiennych.

Drgania mogą powodować liczne uszkodzenia elementów niekonstrukcyjnych i dekoracyjnych budynków, opisane w poprzednich stopniach intensywności oraz dodatkowo niżej wymienione, tj.

- rozległe zarysowania i wykruszenia tynków zewnętrznych i wewnętrznych,
- duże zarysowania i pęknięcia w narożnikach ścian i w fasetach,
- odspojenia i odpadanie większych fragmentów tynków wewnętrznych i zewnętrznych,
- pęknięcia i ubytki zaprawy na stykach elementów, zwłaszcza wykonanych z różnych materiałów budowlanych,
- ciągłe obwodowe zarysowania wokół ościeżnic drzwi i okien,
- liczne pęknięcia i odspojenia płytek ceramicznych,
- pęknięcia i duże poluzowania cegieł kominów murowanych,
- pęknięcia i poluzowania licznych dachówek, spadanie pojedynczych dachówek,
- niewielkie zarysowania i pęknięcia murków ogniowych,
- zniszczenie gzymsów i innych sterczyn.

Odczuwalność drgań przez ludzi: bardzo silna.

W epicentrum wstrząsu drgania odczuwane są jak bardzo silne uderzenie w budynek od spodu i kołysanie. Ściany trzeszczą, a meble mogą przemieszczać się lub kołysać. Na wyższych piętrach odczuwa się bardzo silne kołysanie, szczególnie przy dłuższym czasie trwania drgań.

Wstrząs jest bardzo mocno odczuwany przez większość ludzi. Ludzie są wystraszeni, wielu wybiega na zewnątrz. Niektórzy tracą równowagę.

Drgania o tej intensywności budzą śpiących mieszkańców. Z otwartych naczyń może wylewać się płyn. Przedmioty spadają z półek. UCIAŻLIWOŚĆ: duża.

## STOPIEŃ V (uszkodzenia elementów konstrukcyjnych obniżające odporność dynamiczną budynku)

Oddziaływanie drgań na budynki:

Drgania mogą powodować uszkodzenia elementów konstrukcyjnych budynków, zmniejszając znacząco ich odporność dynamiczną, lecz nie zagrażając jeszcze stateczności tych obiektów. Mogą wystąpić uszkodzenia opisane w stopniu IV i dodatkowo uszkodzenia niżej wymienione, tj.

- szczeliny w ścianach konstrukcyjnych o rozwartości do 5 mm,
- pęknięcia i przemieszczenia cegieł nadproży ceglanych,
- pęknięcia nadproży żelbetowych,
- duże pęknięcia filarów międzyokiennych.

Drgania mogą powodować znaczne uszkodzenia wielu elementów niekonstrukcyjnych i dekoracyjnych budynków do ich zniszczenia włącznie, a w szczególności:

- duże odspojenia i zniszczenia tynków i wypraw,
- duże pęknięcia lub szczeliny w narożnikach ścian i w fasetach,
- obluzowania lub deformacje ościeżnic okien i drzwi,
- zniszczenia dużych powierzchni okładzin wykonanych z płytek ceramicznych,
- odpadanie fragmentów kominów i ścięcie kominów w poziomie dachu,
- uszkodzenia dużych połaci dachu, obluzowanie większości dachówek, odpadanie licznych dachówek,

• szczeliny i odpadanie fragmentów murków ogniowych.

(Drgania są szczególnie groźne w zakresie górnych wartości stopnia V i przy niskiej częstotliwości głównej fazy drgań poziomych f < 5 Hz).

Odczuwalność drgań przez ludzi: bardzo silna i dokuczliwa.

Ściany trzeszczą, a meble mogą się przemieszczać, kołysać i przewracać. Na wyższych piętrach odczuwa się silne kołysanie, szczególnie przy dłuższym

czasie trwania drgań. Ludzie są mocno wystraszeni i wybiegają na zewnątrz. Niektórzy tracą równowagę. Drgania o tej intensywności budzą śpiących mieszkańców. Z półek spadają duże przedmioty, np. telewizory. Mogą powstawać szkody wewnątrz mieszkań wskutek gwałtownego przesuwania się lub rozbijania ciężkich przedmiotów. Na zewnątrz budynku może wystąpić zagrożenie dla ludzi (np. spadanie dachówek i cegieł z kominów). UCIĄŻLIWOŚĆ: duża

## STOPIEŃ VI (uszkodzenia elementów konstrukcyjnych zagrażające stateczności budowli)

Oddziaływanie drgań na budynki:

Drgania mogą powodować bardzo duże uszkodzenia najsilniej wytężonych elementów ustrojów konstrukcyjnych budynków, co może doprowadzić do utraty stateczności tych obiektów, w tym:

- utraty stateczności lokalnej fragmentów budynków,
- utraty stateczności ogólnej całych budynków.

Drgania powodują uszkodzenie lub zniszczenie większości elementów niekonstrukcyjnych budynków.

Drgania mogą zagrażać bezpieczeństwu użytkowników budynków.

Drgania są szczególnie groźne w zakresie niskiej częstotliwości głównej fazy drgań poziomych f < 5 Hz. Wyższe parametry drgań w stopniu VI (powyżej 160 mm/s) mogą być przyczyną zniszczenia najbardziej obciążonych nośnych elementów konstrukcyjnych czy utraty sztywności konstrukcji budynku lub częściowego zawalenia się budynku. Brak jest przykładów pomiarów sejsmometrycznych skorelowanych ze stopniami szkodliwości drgań. W historii górnictwa światowego można jednak znaleźć przypadki wystąpienia takiej intensywności sejsmicznej (zawalenie się budynku mieszkalnego wielorodzinnego w Welkom w RPA w 1976 r. i częściowe zawalenie się budynku jednorodzinnego w Stilfontein w RPA w 2005 r.). Nieznane są jednak wartości pomiarowe parametrów drgań. W polskim górnictwie miedziowym zarejestrowano drgania gruntu o wartości 120 mm/s, które nie wywołały jednak poważnych skutków dla konstrukcji budynków w zabudowie jednorodzinnej (Zembaty i in., 2015).

ODCZUWALNOŚĆ DRGAŃ PRZEZ LUDZI: strach i panika.

Cały budynek kołysze się i trzeszczy, a meble mogą przemieszczać się, kołysać i przewracać. Ludzie są mocno wystraszeni i wybiegają na zewnątrz, większość traci równowagę. Z półek spadają duże przedmioty, np. telewizory. Mogą powstawać szkody wewnątrz mieszkań, wskutek gwałtownego przesuwania się

lub rozbijania ciężkich przedmiotów. Na zewnątrz budynku istnieje zagrożenie dla ludzi – spadanie dachówek, gzymsów, cegieł z kominów, ścian szczytowych. UCIĄŻLIWOŚĆ: nieakceptowalna.

#### Oddziaływanie drgań na liniowe obiekty infrastruktury podziemnej

Dotychczasowe obserwacje oddziaływania wstrząsów na liniowe obiekty infrastruktury podziemnej wskazują na możliwość wystąpienia pojedynczych uszkodzeń instalacji w miejscach połączeń od stopnia III intensywności drgań. Uwagi z obserwacji szkodliwości oddziaływania wstrząsów:

Uszkodzenia obserwowano jedynie w strefie epicentralnej wstrząsów, gdzie największe drgania wywoływane były falami bezpośrednimi typu *S*. Liczba obiektów uszkodzonych nie przekraczała maksymalnie 15% całego zbioru budynków objętych drganiami o określonej intensywności sejsmicznej. Większa część budynków nie uległa żadnym uszkodzeniom w strefie drgań epicentralnych, nawet w stopniu IV lub V pomiarowej intensywności sejsmicznej.

5.2.1.2. Empiryczne kryterium odporności dynamicznej budynków według skali GSIS-2017

Pojęcie dynamicznej odporności obiektów budowlanych na wpływ wstrząsów górniczych zostało wprowadzone w roku 1985 w pracy Gil-Kleczeńskiej, Kwiatka i Muszyńskiego (1985). Z perspektywy minionego czasu można stwierdzić, że pojęcie to zostało dość szybko zaakceptowane w środowisku specjalistów zajmujących się problematyką ochrony zabudowy powierzchni przed wpływami eksploatacji górniczej i jest obecnie powszechnie stosowane (Muszyński, 1993; Kwiatek, 2007; Tatara, 2012; Barański i in., 2014). Pojęcie to zostało też wprowadzone do przepisów prawa dotyczących planów ruchu zakładu górniczego. Odporność dynamiczną obiektu budowlanego definiuje się, biorąc pod uwagę możliwe jego uszkodzenia wywołane drganiami podłoża. GSIS-2017 zawiera opisy uszkodzeń budynków przyporządkowane poszczególnym stopniom intensywności drgań; poziomy odporności dynamicznej można więc określić w ścisłym powiązaniu z tą skalą (Tatara, 2012).

## Definicje odporności dynamicznej obiektów budowlanych

W skali GSIS-2017 ustala się cztery poziomy odporności dynamicznej, definiowane według kryterium możliwych do wystąpienia, a opisanych w skali, skutków wstrząsu, z których każdy kolejny oznacza niższą odporność obiektu na wstrząsy:

• Pełna dynamiczna odporność budynku – oznacza możliwość przejęcia dodatkowych sił powstałych w budynku w wyniku działania wstrząsów górniczych, bez zaistnienia widocznych uszkodzeń elementów nośnych i elementów wykończeniowych.

- Częściowa wysoka odporność dynamiczna budynku oznacza możliwość przejęcia dodatkowych sił powstałych w budynku w wyniku działania wstrząsów górniczych z dopuszczalnymi uszkodzeniami elementów niekonstrukcyjnych i wykończeniowych.
- Częściowa dostateczna dynamiczna odporność budynku oznacza możliwość przejęcia dodatkowych sił powstałych w budynku w wyniku działania wstrząsów górniczych, bez utraty jego stateczności i bez utraty nośności i sztywności jego elementów konstrukcyjnych. Występują uszkodzenia elementów niekonstrukcyjnych i wykończeniowych (nawet znaczne) oraz uszkodzenia elementów konstrukcyjnych.
- Częściowa warunkowa odporność dynamiczna budynku oznacza stan, w którym dodatkowe siły powstałe w budynku w wyniku działania wstrząsów górniczych, powodują uszkodzenia elementów konstrukcyjnych budynku, wpływające na bezpieczeństwo jego konstrukcji. Górną granicę tego stanu wyznacza stan granicznej nośności najsłabszego elementu konstrukcji (brak jest doświadczeń obserwacyjno-pomiarowych z kopalń GZW dla tego poziomu odporności).

## Granice odporności dynamicznej na przykładzie budynków o konstrukcji tradycyjnej i tradycyjnej-ulepszonej w dobrym stanie technicznym

Granicę **pełnej odporności** dynamicznej budynku na wpływy wstrząsów górniczych stanowi granica między stopniem I a II intensywności drgań (jest to granica **nieszkodliwości drgań**).

Granicę **częściowej – wysokiej odporności** dynamicznej budynku na wpływy wstrząsów górniczych stanowi granica między stopniem III a IV intensywności drgań.

Granicę **częściowej – dostatecznej odporności** dynamicznej budynku na wpływy wstrząsów górniczych stanowi granica między stopniem V a VI intensywności drgań (granica **bezpieczeństwa konstrukcji**).

Na granicy między stopniem V i VI intensywności drgań kończą się dotychczasowe doświadczenia obserwacyjno-pomiarowe w GZW.

## 5.2.2. Wpływ rodzaju zabudowy na odporność dynamiczną

Odporność dynamiczna obiektów budowlanych zależy od ich właściwości geometrycznych i konstrukcyjno-materiałowych. Odporność ta jest różna, np.

dwukondygnacyjne jednorodzinne budynki mieszkalne o konstrukcji tradycyjnej mają inną odporność niż wielokondygnacyjne wielorodzinne budynki mieszkalne o konstrukcji wielkoblokowej czy wielkopłytowej. Budynki mieszkalne wielorodzinne o ścianowej konstrukcji nośnej betonowej lub żelbetowej będą charakteryzować się wyższą odpornością dynamiczną niż budynki tradycyjne i tradycyjne-ulepszone. Potwierdzają to skutki wstrząsów górniczych zaobserwowane w trakcie opracowywania skali GSIS-2017. Budynki szkieletowe o konstrukcji żelbetowej lub stalowej są budynkami, których ustrój nośny przystosowany jest zazwyczaj do przenoszenia dużych obciążeń pionowych, natomiast zdolność tych obiektów do przejmowania obciążeń poziomych zależy od sposobu i zakresu usztywnienia obiektu. Standardowo budynki szkieletowe, które nie były projektowane na wpływy wstrząsów górniczych, posiadają usztywnienia pozwalające przenieść obciążenia wiatrem. W związku z powyższym budynki te charakteryzują się odpornością dynamiczną zbliżoną do odporności budynków tradycyjnych i tradycyjnych-ulepszonych. Proponuje się zatem uwzględnienie wpływu rodzaju konstrukcji budynków na ich odporność dynamiczna, z podziałem na trzy grupy budynków:

- budynki murowane o konstrukcji tradycyjnej (T) i tradycyjnej-ulepszonej (T-U), które stanowią przeważającą większość w zabudowie terenów górniczych, i które są głównym przedmiotem obserwacji negatywnych skutków wstrząsów górniczych w istniejącej zabudowie powierzchni,
- budynki ścianowe betonowe i żelbetowe, głównie wielokondygnacyjne występujące w ograniczonej ilości na terenach miejskich,
- budynki szkieletowe o konstrukcji żelbetowej lub stalowej, stanowiące pojedyncze przypadki rozwiązań konstrukcyjnych budynków.

Proponuje się przeprowadzenie oceny skutków wstrząsów górniczych w następujący sposób:

- w przypadku wielorodzinnych budynków mieszkalnych ścianowych betonowych i żelbetowych, przyjmując stopień szkodliwości wstrząsów o jeden stopień niższy niż dla budynków tradycyjnych i tradycyjnych-ulepszonych,
- w przypadku budynków o konstrukcji szkieletowej, przyjmując stopień szkodliwości wstrząsów jak dla budynków tradycyjnych i tradycyjnych--ulepszonych.

Poziomy i granice dynamicznej odporności budynków w odniesieniu do stopni intensywności skali GSIS-2017 dla budynków o różnej konstrukcji i w dobrym stanie technicznym, w formie graficznej przedstawiono w tabeli 5.6. **Tabela 5.6.** Graficzna prezentacja poziomów i granic empirycznej odporności dynamicznej budynków według skali GSIS-2017 dla obiektów w dobrym stanie technicznym

	Obiekty w d	obrym stanie	technicznym	
Stopień pomiarowej intensywności	konstrukcje ścianowe murowane	konstrukcje ścianowe betonowe, żelbetowe	konstrukcje szkieletowe	
Poziomy odporności dynamicznej			namicznej	
0	pełna pełna pełna		pełna	
I	pełna	pełna	pełna	Granica nieszkodliwości drgań
II	wysoka	pełna	wysoka	
III	wysoka	wysoka	wysoka	
IV	dostateczna	wysoka	dostateczna	
V	dostateczna	dostateczna	dostateczna	Granica bezpieczeństwa konstrukcji
VI	warunkowa	warunkowa	warunkowa	

#### Wpływ stanu technicznego obiektów na odporność dynamiczną

Odporność dynamiczna obiektów budowlanych zależy również od stanu technicznego rozpatrywanych obiektów. W większości przypadków gorszy stan techniczny budynków oznacza jednocześnie mniejszą odporność dynamiczną tych obiektów, co wykazały wyniki pomiarów i badań prowadzonych w trakcie tworzenia skali GSIS-2017. Proponuje się, aby w przypadku budynków w złym stanie technicznym, przyjmować odporność dynamiczną obniżoną o jeden stopień intensywności w stosunku do obiektów w dobrym stanie technicznym (tab. 5.7). Należy jednak pamiętać, że w niektórych przypadkach uszkodzeń konstrukcji budynków, zmniejszenie ich sztywności przestrzennej może skutkować obniżeniem wartości sił bezwładności oddziałujących na budynek. Gorszy stan techniczny budynków nie musi wtedy oznaczać obniżenia ich odporności dynamicznej.

Wyznaczenie odporności dynamicznej obiektu według skali GSIS-2017 powinno polegać na wskazaniu stopnia pomiarowej intensywności sejsmicznej lub parametrów drgań ( $PGV_{Hmax} - t_{Hv}$  lub  $PGA_{H10} - t_{Ha}$ ), przy których obiekt zachowa określony poziom odporności, w zależności od swojej konstrukcji i stanu technicznego.

**Tabela 5.7.** Graficzna prezentacja poziomów i granic empirycznej odporności dynamicznej budynków według skali GSIS-2017 dla obiektów w złym stanie technicznym

	Obiekty w	złym stanie te	chnicznym	
Stopień pomiarowej intensywności sojemicznej	konstrukcje ścianowe murowane	konstrukcje ścianowe betonowe, żelbetowe	konstrukcje szkieletowe	
Poziomy odporności dynamicznej				
0	pełna	oełna pełna pełna (		Granica nieszkodliwości drgań
I	wysoka	pełna	wysoka	
I II	wysoka wysoka	pełna wysoka	wysoka wysoka	
I II III	wysoka wysoka dostateczna	pełna wysoka wysoka	wysoka wysoka dostateczna	
I II III IV	wysoka wysoka dostateczna dostateczna	pełna wysoka wysoka dostateczna	wysoka wysoka dostateczna dostateczna	Granica bezpieczeństwa konstrukcji

#### 5.2.2.1. Wyjaśnienie niektórych opisów i definicji budowlanych

## Typy i rodzaje budynków ze względu na konstrukcję nośną

W Górnośląskim Zagłębiu Węglowym rozróżnia się dwa podstawowe typy konstrukcji nośnej budynków:

- budynki o konstrukcji ścianowej, czyli budynki, w których obciążenia pionowe przenoszone są przez ściany budynków,
- budynki o konstrukcji szkieletowej, czyli budynki, w których obciążenia pionowe przenoszone są przez słupy budynków.

Trzecim spotykanym typem konstrukcji nośnej budynków są budynki o mieszanej konstrukcji nośnej, zbudowane zarówno ze ścian, jak i słupów. Dominującym typem konstrukcji nośnej budynków są obecnie budynki o konstrukcji ścianowej.

<u>Budynki o konstrukcji ścianowej</u> są to budynki, których ustrój nośny stanowią ściany budynku. Budynki tego typu występują w następujących odmianach:

 budynki o konstrukcji tradycyjnej – czyli budynki o ścianach nośnych murowanych z kamienia lub z cegły, ze stropami w postaci sklepień ceglanych lub stropów drewnianych, z nadprożami ceglanymi łukowymi lub płaskimi, posadowione na fundamentach kamiennych lub ceglanych; budowane do połowy XX wieku,

- budynki o konstrukcji tradycyjnej-ulepszonej czyli budynki o ścianach nośnych murowanych z cegły, pustaków lub innych elementów drobnowymiarowych, ze stropami żelbetowymi lub ceramicznymi gęstożebrowymi, z nadprożami żelbetowymi płaskimi oraz z żelbetowymi wieńcami obwodowymi, posadowione na fundamentach żelbetowych, wznoszone od drugiej połowy XX wieku,
- budynki o konstrukcji wielkoblokowej czyli budynki o konstrukcji prefabrykowanej, których ściany zbudowane są z elementów ściennych w postaci bloków betonowych, stanowiących wielokrotność cegieł lub pustaków, natomiast stropy wykonane są z prefabrykowanych płyt żelbetowych,
- budynki o konstrukcji ścianowej wielkopłytowej czyli budynki o konstrukcji prefabrykowanej, których ściany zbudowane są z płytowych elementów ściennych, tworzących całą ścianę danej kondygnacji, natomiast stropy wykonane są z prefabrykowanych płyt żelbetowych,
- budynki o konstrukcji ścianowej monolitycznej czyli budynki zbudowane ze ścian i stropów żelbetowych wykonywanych na mokro w miejscu budowy.

<u>Budynki o konstrukcji szkieletowej</u> są to budynki, których ustrój nośny zbudowany jest ze słupów budynku. Budynki tego typu występują w następujących odmianach:

- budynki szkieletowe żelbetowe,
- budynki szkieletowe stalowe,
- budynki szkieletowe drewniane.

#### Elementy konstrukcyjne i niekonstrukcyjne budynku

Elementy konstrukcyjne budynku obejmują:

- elementy ustroju nośnego budynku czyli elementy konstrukcji przenoszące głównie obciążenia pionowe budynku,
- elementy ustroju usztywniającego budynku czyli elementy konstrukcji przenoszące głównie obciążenia poziome budynku.

Część elementów ustroju nośnego budynku jest jednocześnie elementami ustroju usztywniającego budynku.

Elementy niekonstrukcyjne budynku obejmują:

- elementy wypełniające budynku elementy budowlane służące rozplanowaniu przestrzennemu budynku, czyli niekonstrukcyjne ściany zewnętrzne (ściany osłonowe) i niekonstrukcyjne ściany wewnętrzne (ściany działowe) budynku,
- elementy wykończeniowe budynku elementy budowlane służące polepszeniu wyglądu i komfortu użytkowania budynku, takie jak okładziny elewacyjne, tynki, gładzie ścienne i sufitowe, powłoki malarskie, wykładziny ścienne, sufitowe i podłogowe wykonane z płytek ceramicznych, wykładzin i innych okładzin, sufity podwieszane, stolarka okienna i drzwiowa oraz pokrycie dachowe,

 elementy wyposażeniowe budynku – czyli urządzenia i instalacje techniczne zainstalowane w budynku, w tym instalacje dźwigowe, instalacje poszczególnych mediów oraz elementy umożliwiające i wspomagające korzystanie z tych mediów.

#### Uszkodzenia liniowe budynków

Rozróżnia się następujące rodzaje uszkodzeń liniowych elementów budynków:

- rysa, zarysowanie uszkodzenie powierzchniowe o niewielkiej rozwartości,
- pęknięcie uszkodzenie o niewielkiej rozwartości na całą głębokość elementu (na wskroś) – do 5 mm,
- szczelina uszkodzenie o dużej rozwartości na całą głębokość elementu (na wskroś) – powyżej 5 mm.

We wszystkich powyższych przypadkach rodzaj uszkodzenia powinien być doprecyzowany z podaniem szerokości rozwarcia tego uszkodzenia.

## 5.2.2.2. Przykłady klasyfikacji uszkodzeń budynków według skali GSIS-2017

Przykłady uszkodzeń budynków, charakterystyczne dla poszczególnych stopni intensywności drgań powierzchni terenu, zostały przedstawione na fotografiach od 5.2 do 5.16. W ramach selekcji przykładów uszkodzeń budynków, powstałych w wyniku wstrząsów górniczych, skoncentrowano się przede wszystkim na przypadkach odpowiadających najwyższym stopniom intensywności drgań, które występują najrzadziej na terenach górniczych GZW.



**Fot. 5.2.** Stopień V – przemieszczenie konstrukcji dachu, zniszczenie dużych fragmentów ścianek kolankowych\*



Fot. 5.3. Stopień V – zawalenie się fragmentu słabo zamocowanej ściany szczytowej i pęknięcie nadproża ściany nośnej

<sup>\*</sup> Fotografie 5.2–5.30 pochodzą z "Zasad stosowania Górniczej Skali Intensywności Sejsmicznej GSIS-2017 do prognozy i oceny skutków oddziaływania wstrząsów indukowanych eksploatacją na obiekty budowlane oraz klasyfikacji ich odporności dynamicznej" (Mutke i in., 2018b).



Fot. 5.4. Stopień V – krzyżowe pęknięcia ściany konstrukcyjnej widziane od zewnątrz budynku



Fot. 5.5. Stopień V – krzyżowe pęknięcia ściany konstrukcyjnej widziane od wewnątrz budynku



Fot. 5.6. Stopień V – krzyżowe pęknięcie filara Fot. 5.7. Stopień V – ścięcie dwóch kominów międzyokiennego



ceglanych, załamanie fragmentu dachu przy rynnie, uszkodzenia pokrycia dachowego



Fot. 5.8. Stopień IV – pęknięcie i przesunięcie muru komina ceglanego nad dachem



Fot. 5.9. Stopień III – zerwanie warstwy ocieplającej ściany szczytowej budynku gospodarczego



Fot. 5.10. Stopień III – duże rozluźnienia i uszkodzenia dachówek w rejonie okna dachowego



**Fot. 5.11.** Stopień III – ścięcie spoiny muru komina z przemieszczeniem jego górnej części i ubytki cegieł z drugiego komina



**Fot. 5.12.** Stopień III – odspojenie tynku muru zewnętrznego – Doubrava (Czechy)



**Fot. 5.13.** Stopień III – odspojenie płytek



Fot. 5.14. Stopień III – uszkodzenia tynku wokół ościeżnicy okna



**Fot. 5.15.** Stopień II – pęknięcia i odspojenia gładzi na styku płyt gipsowo-kartonowych

**Fot. 5.16.** Stopień II – zarysowanie tynku łuku ceglanego

5.2.2.3. Przykłady typów obiektów budowlanych uwzględnionych w skali GSIS-2017



Fot. 5.17. Budynek mieszkalny jedenastokondygnacyjny wybudowany w technologii wielkopłytowej



Fot. 5.18. Budynek mieszkalny pięciokondygnacyjny wybudowany w technologii wielkopłytowej





**Fot. 5.19.** Budynki mieszkalne trzykondygnacyjne wybudowane w technologii tradycyjnej



**Fot. 5.20.** Budynek mieszkalny dwukondygnacyjny wybudowany w technologii tradycyjnej



**Fot. 5.21.** Budynek mieszkalny jednorodzinny wybudowany w technologii tradycyjnej-ulepszonej



**Fot. 5.22.** Budynek mieszkalny jednorodzinny wybudowany w technologii tradycyjnej



**Fot. 5.23.** Budynek mieszkalny jednorodzinny wybudowany w technologii tradycyjnej



**Fot. 5.24.** Budynek mieszkalny wybudowany w technologii tradycyjnej





Fot. 5.25. Budynek zabytkowy wielorodzinny wybudowany w technologii tradycyjnej



**Fot. 5.26.** Budynek mieszkalny drewniany wybudowany w technologii tradycyjnej



**Fot. 5.27.** Budynek mieszkalny wybudowany w technologii szkieletowej o konstrukcji żelbetowej



**Fot. 5.28.** Budynek muzealny wrażliwy na drgania i w złym stanie technicznym



**Fot. 5.29.** Budynek muzealny wrażliwy na drgania i w złym stanie technicznym



**Fot. 5.30.** Budynek mieszkalny wybudowany w technologii tradycyjnej poddany wpływom deformacji ciągłych i kotwiony



## 5.2.3. Weryfikacja parametrów drgań od silnych wstrząsów górniczych ze stopniami intensywności w skali GSIS-2017

Opracowanie skali GSIS-2017 wymagało przeprowadzenia analizy bardzo silnych wstrząsów górniczych zaistniałych w GZW w latach 2014–2016. Skutkiem tych wstrząsów były liczne szkody w budynkach (od kilkudziesięciu do kilkuset zgłoszonych przypadków) i silna odczuwalność drgań przez ludzi. Przykładowo wstrząs w ZG Janina o energii sejsmicznej E = 9E8 J w dniu 30.09.2015 r. spowodował uszkodzenia w ponad 500 budynkach. W prezentowanej wersji skali uwzględniono wyniki rejestracji i obserwacji wstrząsów o energii sejsmicznej przekraczającej 10<sup>8</sup> J oraz o pikowych prędkościach drgań  $PGV_{Hmax} > 0,05$  m/s i przyspieszeniu  $PGA_{H10} > 1,0$  m/s<sup>2</sup>. Do weryfikacji włączono również wyniki badań z projektu międzynarodowego COMEX, w którym jedno z zadań dotyczyło opracowania europejskiej wersji skali intensywności sejsmicznej od wstrząsów indukowanych eksploatacją górniczą (MSIIS-15). Realizacją tego zadania kierował Główny Instytut Górnictwa (Mutke i in., 2015a; Kotyrba i Mutke, 2015).

## 5.2.3.1.Zbiór wstrząsów wykorzystanych do weryfikacji skali GSIS-2017

Skala GSIS-2017 wyróżnia siedem stopni pomiarowej intensywności sejsmicznej (od 0 do VI) z przypisanymi im na podstawie obserwacji makrosejsmicznych skutkami drgań w budynkach. W celu dokonania weryfikacji skali przeprowadzono analizę obszernego materiału pomiarowego i obserwacyjnego zawierającego:

- dane charakteryzujące parametry drgań wybranych wstrząsów górniczych o energii od 1E6 J do 4E9 J,
- charakterystyki uszkodzeń budynków inwentaryzowanych po wstrząsach lub ich brak,
- rozkład wartości parametrów drgań najsilniejszych wstrząsów, które wystąpiły w latach 2014–2016 w: ZG Janina (30.09.2015 r. – E = 9E8 J, 20.10.2015 r. – E = 7E8 J i 18.11.2015 r. – E = 1E9 J), kopalni Marcel (21.06.2016 r. – E = 1E8 J), kopalni Bobrek-Piekary (3.06.2016 r. – E = 3E8 J) i kopalni Wujek (26.05.2014 r. – E = 8E8 J i 18.04.2015 r. – E = 4E9 J), po których obserwowano liczne uszkodzenia budynków oraz wstrząsu w zagłębiu Saarland w Niemczech (23.02.2008 r. –  $M_L$  = 4,1),

- wszystkie informacje wykorzystane wcześniej do weryfikacji skali GSI-2008 i GSI-2012,
- informacje wykorzystane do weryfikacji skali MSIIS-2015 pochodzące z innych europejskich zagłębi węglowych (Mutke i in., 2015a).

Dane dostarczone przez kopalnie zostały szczegółowo przeanalizowane z wyselekcjonowaniem przypadków spełniających dwa podstawowe warunki:

- usytuowanie budynku w stosunku do urządzenia rejestrującego drgania powierzchni spowodowane wstrząsem górniczym jest na tyle bliskie, że daje możliwość określenia parametrów drgań powierzchni w miejscu lokalizacji budynku bezpośrednio z dokonanych rejestracji – pomiarów lub w przypadku map są to wartości określone z zastosowaniem wzorów empirycznych, z uwzględnieniem parametrów rzeczywistych drgań zarejestrowanych dla analizowanego wstrząsu,
- jest dostępny opis skutków (stwierdzonych uszkodzeń) powstałych w budynku, które można jednoznacznie przypisać oddziaływaniu zidentyfikowanego wstrząsu górniczego.

Zbiór wstrząsów wykorzystanych do weryfikacji skali GSIS-2017 przedstawiono na rysunku 5.12. Zasada sporządzania wykresu polegała na naniesieniu każdej zarejestrowanej wartości parametrów drgań ( $PGV_{Hmax}$  i  $t_{Hv}$ ) i przypisaniu jej najwyższego stopnia szkodliwości, odpowiadającego skutkom obserwowanym w budynkach zlokalizowanych w promieniu 250 m od stacji pomiarowej. Kształt i kolor znacznika oznaczają zaobserwowane skutki makrosejsmiczne drgań, a ich lokalizacja na podkładzie skali wskazuje stopień pomiarowej intensywności sejsmicznej. W porównaniu do poprzedniej wersji skali GSI<sub>GZWKW</sub>-2012 obecny zestaw danych pomiarowych został uzupełniony o dane dotyczące szczególnych przypadków wystąpienia intensywności sejsmicznej powyżej dolnej granicy stopnia IV.

Do weryfikacji wykorzystano wstrząsy charakteryzujące się następującym zakresem parametrów drgań podłoża:

- pikowe wartości amplitud poziomych prędkości drgań podłoża PGV<sub>Hmax</sub> od 0,0005 m/s do 0,12 m/s,
- pikowe wartości amplitud poziomych przyspieszeń drgań podłoża w paśmie do 10 Hz, *PGA<sub>H10</sub>*: od 10 mm/s<sup>2</sup> do 2,8 m/s<sup>2</sup>,
- czas trwania głównej fazy drgań od 0,5 s do 12 s.



**Rys. 5.12.** Weryfikacja skali GSIS-2017 po wprowadzeniu danych pomiarowych z lat 2006–2016; symbole graficzne odpowiadają zaobserwowanym uszkodzeniom, a ich położenie wynika z parametrów przypisanych pomiarowej intensywności sejsmicznej wyznaczonej z amplitudy *PGV*<sub>Hmax</sub> i czasu trwania drgań *t*<sub>Hv</sub>

Objaśnienie znaków graficznych:

- wstrząsy <u>słabo zauważalne</u> nieodczuwalne przez ludzi bądź słabo odczuwalne i niewywołujące żadnych skutków w budynkach,
- wstrząsy <u>odczuwalne</u> silnie odczuwalne przez ludzi znajdujących się wewnątrz budynków na wyższych piętrach – tylko sporadycznie powodujące powiększanie się istniejących uszkodzeń w budynkach o dużym naturalnym zużyciu i w złym stanie technicznym,
- po wstrząsach wystąpiła <u>intensyfikacja istniejących uszkodzeń</u> silnie odczuwalne przez ludzi wewnątrz i na zewnątrz budynków – powiększanie się istniejących wcześniej uszkodzeń elementów niekonstrukcyjnych; brak uszkodzeń w budynkach w dobrym stanie technicznym,
- po wstrząsach wystąpiły <u>uszkodzenia elementów niekonstrukcyjnych i dekoracyjnych</u> silnie odczuwalne przez ludzi – pierwsze uszkodzenia elementów niekonstrukcyjnych i dekoracyjnych – powiększenie istniejących wcześniej uszkodzeń elementów niekonstrukcyjnych,
- po wstrząsach stwierdzono <u>pojedyncze, lekkie uszkodzenia konstrukcyjne</u> bardzo silnie odczu- walne przez ludzi i wzbudzające przestrach – niewielkie uszkodzenia pojedynczych elementów konstrukcyjnych, bez wpływu na nośność konstrukcji; w budynkach w złym stanie technicznym liczne uszkodzenia konstrukcyjne niepowodujące zagrożenia stateczności całej konstrukcji nośnej budowli,
- po wstrząsach stwierdzono <u>uszkodzenia konstrukcyjne</u> bardzo silnie odczuwalne przez ludzi i wzbudzające przestrach/panikę – uszkodzenia konstrukcyjne niepowodujące zagrożenia stateczności całej konstrukcji nośnej budowli, ale mogące osłabiać jego odporność dynamiczną.

Granice poszczególnych stopni intensywności, wyznaczone w zweryfikowanej skali GSIS-2017, dają dużą gwarancję poprawnej korelacji stopnia intensywności sejsmicznej  $I_{GSIS}$  wyznaczanego z pomiarowych parametrów drgań podłoża z opisanymi dla niego skutkami wstrząsów w formie stopni szkodliwości drgań *S*. Pewność (prawdopodobieństwo), że nie wystąpią skutki przypisane do wyższego stopnia intensywności drgań, wynosi:

- dla stopnia 0 *P* = 100%,
- dla stopnia I P = 92%,
- dla stopnia II P = 87%,
- dla stopnia III P = 95%,
- dla stopnia IV P = 100%,
- dla stopnia V *P* = 100%.

Z analizy skutków wstrząsów w obiektach budowlanych na powierzchni, prowadzonych od roku 2006 wynika, że dla 433 silnych wstrząsów o energii E6–E9 J, uszkodzenia elementów konstrukcyjnych zaobserwowano jedynie w przypadku 19 wstrząsów, w tym jednego wstrząsu w zagłębiu Saarland w Niemczech.

Przeprowadzona w ramach weryfikacji skali analiza kilkuset przypadków uszkodzeń budynków po najsilniejszych wstrząsach, wykazała wpływ rozwiązań konstrukcyjnych na rodzaj uszkodzeń występujących w wyniku działania wstrząsu (budynki tradycyjne, tradycyjne-ulepszone, budynki o konstrukcji ścianowej betonowej i żelbetowej, budynki szkieletowe o konstrukcji żelbetowej lub stalowej), podobnie jak stan techniczny budynku. Analiza rodzaju uszkodzeń pozwoliła na zmodyfikowanie dotychczasowych granic stopni intensywności w zakresie stopni związanych z uszkodzeniami elementów konstrukcyjnych i/lub zagrożeniem użytkowania budynków.

Ocena intensywności drgań, wykonywana przy użyciu skali GSIS-2017 w wersji z przyspieszeniem drgań, jest mniej wiarygodna niż w wersji z prędkością drgań podłoża.

#### 5.2.3.2. Analiza wybranego wstrząsu z grupy najsilniejszych, które wystąpiły w GZW w latach 2014-2016

W drugiej połowie roku 2015 wystąpiły trzy bardzo silne wstrząsy górotworu w obszarze ZG Janina, które spowodowały uszkodzenia w kilkuset budynkach. Był to jeden z najważniejszych materiałów do modernizacji i weryfikacji skali. Każdy wstrząs charakteryzował się silnymi amplitudami prędkości i przyspieszenia drgań. Epicentra wstrząsów znajdowały się w miejscowości Żarki i w bezpośrednim sąsiedztwie Libiąża.

Po zaistnieniu trzech silnych wstrząsów w obszarze ZG Janina, przyjęto łącznie 1705 zgłoszeń o wystąpieniu uszkodzeń w budynkach. Z Żarek wpłynęło najwięcej, bo 516 zgłoszeń, z których 277 dotyczyło uszkodzenia kominów.
Zabudowa mniejszych miejscowości omawianego terenu (np. Żarki) jest dużo bardziej jednolita od zabudowy miejskiej Libiąża. Tworzą ją przede wszystkim jednorodzinne budynki mieszkalne, z reguły wybudowane jako obiekty wolno stojące, wykonane w technologii tradycyjnej (starsze obiekty) lub tradycyjnej-ulepszonej. Obiektom tym towarzyszą czesto budynki gospodarcze i garażowe. Pozostałą zabudowę powierzchni mniejszych miejscowości stanowią z reguły pojedyncze obiekty użyteczności publicznej (kościół, szkoła itp.) oraz nieliczne obiekty handlowo-usługowe. Zabudowę kubaturową mniejszych miejscowości uzupełniają na ogół nieliczne obiekty inżynierskie, takie jak mosty, wiadukty oraz przepusty cieków wodnych, jak również naziemne i podziemne sieci infrastruktury technicznej. Część obiektów znajdowała się w przeszłości lub w czasie wstrząsów na obszarze deformacji ciągłych kategorii III-V. W Libiążu, zlokalizowanym w bliskim sąsiedztwie ognisk wstrząsów i częściowo objętym strefą drgań epicentralnych, zgłoszono 400 uszkodzeń budynków. Zabudowa Libiaża jest bardziej urozmaicona niż Żarek. Oprócz zabudowy jednorodzinnej w technologii tradycyjnej i tradycyjnej-ulepszonej, występuje również zabudowa mieszkalna, w postaci budynków wielorodzinnych wzniesionych w technologii tradycyjnej-ulepszonej i technologii uprzemysłowionej.

Typowymi uszkodzeniami, które wystąpiły w obiektach zlokalizowanych w Żarkach i w Libiążu po wstrząsach o energii  $E = 9 \cdot 10^8$  J,  $E = 7 \cdot 10^8$  J i  $E = 1 \cdot 10^9$  J, były uszkodzenia elementów wykończeniowych (spękania wypraw tynkarskich ściennych w postaci okrojenia i rys nadproży, płyt stropowych, ścianek działowych itp., spękania i odspojenia okładzin ściennych) oraz elementów konstrukcyjnych (spękanie kominów wolno stojących w części strychowej i naddachowej, pęknięcia ścianek szczytowych, okrojenia ścianek kolankowych, pęknięcia murów ścian itp.).

W samej strefie epicentralnej wstrząsu w miejscowości Żarki znajdowały się budynki o konstrukcji tradycyjnej i tradycyjnej-ulepszonej, w których stwierdzono następujące rodzaje uszkodzeń (Muszyński i in., 2015):

- ścięcie kominów ceglanych w poziomie dachu,
- zniszczenie samonośnych konstrukcji kominów,
- uszkodzenia pokrycia dachowego i/lub uszkodzenia konstrukcji dachu,
- zawalenie się fragmentów ścian szczytowych,
- uszkodzenia ścian szczytowych na styku z konstrukcją dachu,
- silne uszkodzenia rozległych fragmentów ścian (różnokierunkowe zarysowania i pęknięcia ścian),
- odpadanie dużych fragmentów tynku,

- krzyżowe pęknięcia ścian konstrukcyjnych, ze znacznym osłabieniem odporności ustroju konstrukcyjnego budynku,
- odpadnięcie dużego fragmentu warstw ocieplających.

Część uszkodzonych budynków znajdowała się w strefie objętej deformacjami ciągłymi i w tych budynkach obserwowano większe uszkodzenia przy podobnym poziomie drgań.

W tabeli 5.8 przedstawiono najwyższe wartości parametrów drgań, zarejestrowane dla trzech wstrząsów na stacjach sejsmicznych w Żarkach, Libiążu i Chrzanowie.

Parametr	Wstrząs 1	Wstrząs 2	Wstrząs 3						
Data wystąpienia	30.09.2015	20.10.2015	18.11.2015						
Czas wystąpienia	11.13	22.23	00.27						
Energia w epicentrum, J	9,0·10 <sup>8</sup>	6,0·10 <sup>8</sup>	1,0·10 <sup>9</sup>						
Lokalizacja stanowiska pomiarowego: Żarki (obok kościoła)									
Odległość epicentralna, m	1499	1499 1468							
Maksymalna prędkość drgań v, m/s	0,0663	0,0224	0,0475						
Czas trwania $t_{\nu}$ , s	1,18	3,75	2,03						
Maksymalne przyspieszenie drgań <i>a</i> , m/s <sup>2</sup>	1,6350	0,6614	1,2082						
Czas trwania $t_a$ , s	1,04	2,55	1,39						
Największa intensywność według GSIS-2017	IV	II	IV						
Lokalizacja stanowiska pomiarowego: Libiąż (w budynku Polskiego Kościoła Narodowego)									
Odległość epicentralna, m	brak danych	2495	2585						
Maksymalna prędkość drgań v, m/s	brak danych	0,0625	0,0561						
Czas trwania $t_{\nu}$ , s	brak danych	3,66	2,56						
Maksymalne przyspieszenie drgań <i>a</i> , m/s <sup>2</sup>	brak danych	1,7337	1,3744						
Czas trwania <i>t</i> <sub>a</sub> , s	brak danych	2,37	2,16						
Stopień intensywności według GSIS-2017	brak danych	V	IV						
Lokalizacja stanowiska pomiarowego: Chrzanów,	Lokalizacja stanowiska pomiarowego: Chrzanów, ul. Powstańców Styczniowych								
Odległość epicentralna, m	4945	5019	5150						
Maksymalna prędkość drgań v, m/s	0,0066	0,0077	0,0097						
Czas trwania $t_{\nu}$ , s	7,77	6,72	7,45						
Maksymalne przyspieszenie drgań <i>a</i> , m/s <sup>2</sup>	0,1420	0,1878	0,2202						
Czas trwania <i>t</i> <sub>a</sub> , s	7,08	6,4	8,6						
Stopień intensywności według GSIS-2017	Ι	Ι	Ι						

Tabela 5.8. Parametry trzech najsilniejszych wstrząsów górotworu w ZG Janina

W tabeli 5.9 przedstawiono największe uszkodzenia jednorodzinnych budynków mieszkalnych o konstrukcji tradycyjnej i tradycyjnej-ulepszonej w miejscowości Żarki, po trzech silnych wstrząsach górniczych. Wszystkie opisane budynki mieściły się w kwartale I miejscowości Żarki (patrz rys. 5.16), w którym amplitudy prędkości zawierały się w zakresie od 0,06 do 0,12 m/s, a przyspieszenia w zakresie od 1,5 do 2,8 m/s<sup>2</sup>, przy krótkich czasach trwania głównej fazy drgań około 1 s.

**Tabela 5.9.** Najsilniejsze uszkodzenia jednorodzinnych budynków mieszkalnych o konstrukcji tradycyjnej i tradycyjnej-ulepszonej w miejscowości Żarki po silnych wstrząsach górniczych, które wystąpiły od września do listopada 2015 r. (zestawienie sporządzone w celu weryfikacji skali GSIS-2017)

	Decyzja Powiatowego Inspektora Nadzoru Budowlanego	budynek wyłączony z użytkowania	budynek wyłączony z użytkowania	obowiązek wykonania ekspertyzy	I	budynek wyłączony z użytkowania	I	I	I	I
	Zagrożenie bezpieczeństwa użytkowników	występuje	występuje	występuje przy ponownym powstaniu silnych wstrząsów	występuje przy ponownym powstaniu silnych wstrząsów	występuje w przypadku dachów stromych	występuje	występuje	występuje w przypadku dachów stromych	nie występuje
	Stopień szkodliwości w skali GSIS wg obserwowanych skutków i zagrożenia (S)	V	V	V	V	V	V	V	V	IV
	Kwalifikacja typu uszkodzeń	uszkodzenie ściany szczytowej powodujące brak jej stabilności	zniszczenia i silne uszkodzenia rozległych fragmentów ścian budynku, ścięcia kominów z ich niewielkim przemieszczeniem	znaczne osłabienie ustroju konstrukcyjnego budynku	znaczne osłabienie ustroju konstrukcyjnego budynku	zniszczenie samonośnych konstrukcji kominów i uszkodzenia dachu	zniszczenie fragmentów ścian szczytowych	zniszczenie fragmentów ścian szczytowych	zniszczenie samonośnych konstrukcji kominów	różnokierunkowe zarysowania i pęknięcia ścian
	Uszkodzenia budynków powstałe w wyniku wstrząsów	pęknięcia i deformacje w górnej części północno-zachodniej ściany szczytowej, możliwość awarii tej części ściany	przemieszczenia konstrukcji dachu, zniszczenie dużych fragmentów ścianek kolankowych, silne uszkodzenia ścian budynku, uszkodzenia kominów ponad powierzchnią dachu	krzyżowe pęknięcia ścian konstrukcyjnych	krzyżowe pęknięcia ścian konstrukcyjnych	ścięcie kominów ceglanych w poziomie dachu, uszkodzenia pokrycia dachowego, uszkodzenia konstrukcji dachu	uszkodzenia ścian szczytowych na styku z konstrukcją dachu	zawalenie się fragmentów ścian szczytowych	ścięcie kominów ceglanych w poziomie dachu, uszkodzenia pokrycia dachowego	pęknięcia ścian i nadproży
	Stan techniczny budynku przed wystąpieniem wstrząsów	elementy w złym stanie	elementy w złym stanie	elementy w złym stanie	dobry	zły, duże naturalne zużycie	dobry	dobry	dobry	dobry
	Lokalizacja budynku (wg rys. 5.16) I <sub>GSIS</sub>	Żarki, kwartał I I <sub>GSIS</sub> = V	Źarki, kwartał I I <sub>GSIS</sub> = V	Żarki, kwartał I I <sub>GSIS</sub> = V	Żarki, kwartał I I <sub>GSIS</sub> = V	Žarki, kwartał I I <sub>GSIS</sub> = V	Žarki, kwartał I I <sub>GSIS</sub> = V	Żarki, kwartał I I <sub>GSIS</sub> = V	Žarki, kwartał I I <sub>GSIS</sub> = V	Žarki, kwartał I I <sub>GSIS</sub> = V

	ı	I.	obowiązek wykonania ekspertyzy	ī	I	I	tymczasowy nakaz opuszczenia budynku	1	I	I.
występuje w przypadku ścian szczytowych	występuje	występuje	nie występuje	występuje w przypadku komina i odpadającego tynku	występuje	występuje	występuje	występuje w przypadku komina i odpadającego tynku	występuje	występuje – w przypadku naruszonego gzymsu
v	v	v	IV/V	IV	IV	IV	IV/V	III/IN	IV	IV
zniszczenie fragmentów ścian szczytowych, pęknięcie komina murowanego	zniszczenie samonośnych konstrukcji kominów	zniszczenie samonośnych konstrukcji kominów	różnokierunkowe zarysowania i pęknięcia ścian oraz trzonu kominowego	zniszczenie fragmentu komina, pęknięcia ścian, odpadanie dużych fragmentów tynku	ubytki cegieł i ścięcia kominów z ich niewielkim przemieszczeniem, odpadnięcie dużego fragmentu warstw ocieplających	zniszczenie fragmentów dachu i pęknięcia ścian	uszkodzenie samonośnej konstrukcji komina i uszkodzenia ścian budynku	zniszczenie fragmentu komina, róźnokierunkowe zarysowania i pęknięcia ścian, odpadanie dużych fragmentów tynku	wada budowlana	zarysowania i pęknięcia ścian, poluzowanie cegieł komina, uszkodzenia gzymsu
uszkodzenia ścian szczytowych na styku z konstrukcją dachu, uszkodzenia trzonów kominowych poniżej powierzchni dachu	uszkodzenia i ścięcia kominów ceglanych ponad powierzchnią dachu, uszkodzenia pokrycia dachowego	uszkodzenia i ścięcia kominów ceglanych ponad powierzchnią dachu, uszkodzenia pokrycia dachowego	silne pęknięcia ścian budynku, uszkodzenia trzonów kominowych poniżej powierzchni dachu	uszkodzenia komina ponad powierzchnią dachu, silne pęknięcia ścian budynku i rozległe ubytki tynku ścian	ścięcia spoin kominów i przemieszczenie ich górnych części, uszkodzenia elementów wykończeniowych budynku	uszkodzenia konstrukcji dachu w rejonie belki kalenicowej, pęknięcia ścian	uszkodzenie komina w części ponad dachem, pęknięcia ścian	uszkodzenia kominów, pęknięcia ścian i odpadanie fragmentów tynku	uszkodzenia i awaria nadproża drzwiowego	silne uszkodzenia ścian budynku, uszkodzenia elementów wykończeniowych (gzymsów)
dobry	dobry	dobry	elementy w złym stanie	dobry	średni	dobry	elementy w złym stanie	dobry	dobry	dobry
Żarki, kwartał I I <sub>GSIS</sub> = V	Żarki, kwartał I I <sub>GSIS</sub> = V	Żarki, kwartał I I <sub>GSIS</sub> = V	Żarki, kwartał I I <sub>GSIS</sub> = V	Żarki, kwartał I I <sub>GSIS</sub> = V	Żarki, kwartał I I <sub>GSIS</sub> = V	Żarki, kwartał I I <sub>GSIS</sub> = V	Żarki, kwartał I I <sub>GSIS</sub> = V	Żarki, kwartał I I <sub>GSIS</sub> = V	Żarki, kwartał I I <sub>GSIS</sub> = V	Żarki, kwartał I I <sub>GSIS</sub> = V

Kontrola stanu technicznego obiektów budowlanych uszkodzonych w wyniku wstrząsów, przeprowadzona przez Powiatowego Inspektora Nadzoru Budowlanego w Chrzanowie i wyniki komisyjnych przeglądów powstałych uszkodzeń wykazały dla sześciu budynków mieszkalnych (wiersze z zaciemnionym tłem w tab. 5.9) możliwość poważnego uszkodzenia ich konstrukcji. Dla tych budynków zostały opracowane ekspertyzy budowlane. W ww. przypadkach uszkodzenia obiektów (jak wynika z opracowanych dla PINB ekspertyz budowlanych) dotyczyły w większości elementów będących w złym stanie technicznym, wynikającym z błędów budowlanych i z braku należytej konserwacji obiektów.

#### Wstrząs w dniu 30.09.2015 r. o energii sejsmicznej E = 9E8 J

Jako przykład prezentacji i oddziaływania drgań po trzech silnych wstrząsach, które wystąpiły na obszarze ZG Janina, do prezentacji wybrano pierwszy z nich, tj. wstrząs w dniu 30.09.2015 r. o energii sejsmicznej E = 9E8 J. Wstrząs wystąpił w południowej części wsi sołeckiej Żarki. Wstrząs zarejestrowała najbliższa stacja pomiarowa AMAX-GSI w Żarkach, w odległości epicentralnej  $r_e$  = 1499 m. Na tej odległości od epicentrum nie utworzyły się jeszcze fale powierzchniowe, a maksymalną amplitudę prędkości i przyspieszenia drgań zarejestrowano od fal poprzecznych *S* (rys. 5.13).



**Rys. 5.13.** Przebieg czasowy prędkości drgań zarejestrowanych w Żarkach od wstrząsu w dniu 30.09.2015 r. o energii sejsmicznej E = 9E8 J; maksymalna amplituda prędkości drgań poziomych  $PGV_{Hmax} = 0,066$  m/s



**Rys. 5.13a.** *FFT* obliczone z przebiegu czasowego prędkości drgań zarejestrowanych w Żarkach od wstrząsu w dniu 30.09.2015 r. o energii sejsmicznej E = 9E8 J; amplitudy głównej fazy drgań odnoszą się do pakietu częstotliwości z zakresu od 1,5 do 6,0 Hz dla składowych poziomych



**Rys. 5.13b.** Pseudoprędkościowe spektrum odpowiedzi obliczone z przebiegu czasowego składowych poziomych zarejestrowanych w Żarkach od wstrząsu w dniu 30.09.2015 r. o energii sejsmicznej E = 9E8 J; główna faza odpowiedzi odnosi się do obiektów o częstotliwości drgań własnych z zakresu od 2,5 do 6 Hz



**Rys. 5.14.** Czas trwania składowej poziomej głównej fazy prędkości drgań zarejestrowanych w Żarkach od wstrząsu w dniu 30.09.2015 r. o energii sejsmicznej *E* = 9E8 J

Przy przyjęciu prędkości fali poprzecznej *S* równej 2700 m/s i dla częstotliwości drgań 3,5 Hz (istotna grupa falowa drgań poziomych dla analizowanego wstrząsu), długość fali wynosi L = 771 m. Stacja sejsmiczna w Żarkach znajdowała się więc w odległości około dwóch długości fali poprzecznej. Zwraca uwagę bardzo krótki czas trwania tego zjawiska sejsmicznego  $t_{Hv}$  = 1,18 s (rys. 5.14).

Parametry zarejestrowanych drgań na stacji sejsmicznej AMAX-GSI, tj.  $PGV_{Hmax} = 0,066$  m/s i czas trwania  $t_{Hv} = 1,18$  s, klasyfikują ten wstrząs do stopnia IV intensywności drgań w skali GSIS-2017. Uszkodzenia w obszarze do 250 m od epicentrum wystąpiły w 10 budynkach, czyli w populacji około 15% budynków (rys. 5.15). W 70 budynkach nie stwierdzono żadnych uszkodzeń. Należy podkreślić, że budynki w promieniu 250 m od stacji sejsmicznej w Żarkach były na ogół w dobrym stanie technicznym, w tym kościół, w sąsiedztwie którego zainstalowane są mierniki drgań. Podstawowe dwie grupy obserwowanych uszkodzeń to uszkodzenia kominów w sześciu budynkach i cztery budynki z zarysowanymi ścianami i tynkami. Wymienione uszkodzenia i związane z nimi zagrożenie użytkowania budynków można zakwalifikować do maksymalnie stopnia IV intensywności drgań (liczne uszkodzenia elementów niekonstrukcyjnych i dekoracyjnych budynków, lekkie uszkodzenia elementów konstrukcyjnych). Taki sam stopień pomiarowej intensywności sejsmicznej wskazują parametry drgań podłoża zarejestrowane na zainstalowanej stacji sejsmicznej AMAX-GSI. Obserwacje te potwierdzają dobrą zgodność intensywności wyznaczonej z pomiarów sejsmometrycznych ze skutkami drgań (szkodami) opisanymi w stopniu IV w skali GSIS-2017.



**Rys. 5.15.** Uszkodzenia zgłoszone i potwierdzone w promieniu 250 m od rejestracji drgań na stacji sejsmicznej w Żarkach (wewnątrz okręgu) – kółka niebieskie to budynki z uszkodzonymi kominami; kółka zielone to budynki z zarysowanymi ścianami lub tynkami (Muszyński i in., 2015)

W strefie blisko stacji rejestracyjnej AMAX-GSI znajduje się szkoła, gdzie wystąpiły drgania na poziomie ponad 0,06 m/s (stopień IV intensywności pomiarowej w skali GSIS-2017). W szkole tej bardzo silnie odczuwano drgania. Podłoga bardzo mocno zafalowała, a część dzieci miała problem z utrzymaniem równowagi. Takie odczuwanie wstrząsu powoduje duży dyskomfort dla mieszkańców.

Parametry drgań podłoża, którym poddane były budynki z obszaru przedstawionego na rysunku 5.16, były następujące:

- $PGV_{Hmax} = 0,066 \text{ m/s i } t_{Hv} = 1,18 \text{ s},$
- $PGA_{H10} = 1,635 \text{ m/s}^2 \text{ i } t_{Ha} = 1,04 \text{ s.}$

Wstrząsy w strefie epicentralnej charakteryzowały się bardzo krótkimi czasami trwania głównej fazy drgań podłoża. Częstotliwość największej odpowiedzi pseudoprędkościowego spektrum wynosiła dla pierwszej składowej poziomej 5 Hz, natomiast dla drugiej do niej prostopadłej, ponad 3 Hz (rys. 5.13b).

Więcej obiektów z poważniejszymi uszkodzeniami obserwowano w populacji obiektów bliżej epicentrum wstrząsu znajdującym się około 1500 m na południe od stacji sejsmometrycznej AMX-GSI, gdzie dodatkowo budynki były poddane deformacjom ciągłym, a część z nich była w złym stanie technicznym.

W tym obszarze bliżej epicentrum nie rejestrowano drgań. Budynki te znajdowały się głównie między ogniskiem wstrząsu a stacją AMAX w Żarkach, czyli na tym samym kierunku emisji drgań (rys. 5.16 i 5.17).



**Rys. 5.16.** Zasięg izolinii przyspieszenia drgań  $PGA_{H10}$  wyznaczony dla wstrząsu w dniu 30.09.2015 r. o energii E = 9E8 J, uwzględniający rejestracje na stacji pomiarowej przedstawione na tle mapy rejonu



**Rys. 5.17.** Zasięg izolinii prędkości drgań  $PGV_{Hmax}$  wyznaczony dla wstrząsu w dniu 30.09.2015 r. o energii *E* = 9E8 J, uwzględniający rejestracje na stacji pomiarowej, przedstawione na tle mapy z naniesionymi na nią uszkodzonymi budynkami

Można zatem wnioskować, że w epicentrum prędkość drgań mogła osiągnąć o około 80% wyższe amplitudy, jeżeli zastosuje się wzór na funkcję tłumienia drgań opracowany dla GZW (Mutke, 1991). Takie obliczenia można wykonać, ponieważ najwyższe drgania zarejestrowane na stacji AMAX-GSI w Żarkach w odległości około 1,5 km od epicentrum, były od bezpośrednich fal poprzecznych S (rys. 5.13) i nie wchodziło w tym przypadku w rachubę zaburzenie relacji tłumienia związane z rejestracją innych rodzajów fal, np. fal powierzchniowych. Ponadto sama stacja sejsmometryczna AMAX-GSI zlokalizowana jest na podłożu o predkości fali sejsmicznej  $V_{S30}$  = 821 m/s, co odpowiada klasie A gruntów według normy Eurokod 8, czyli twardego podłoża, które nie powoduje wzmocnienia drgań. Tak więc w odległości 500-900 m od epicentrum, w miejscu wystąpienia największych obserwowanych uszkodzeń budynków na poziomie stopnia V skali GSIS-2017, amplitudy drgań poziomych PGV<sub>Hmax</sub> mieściły się w zakresie 90–105 mm/s, przy podobnie krótkim czasie trwania około 1 s. Na podstawie fotografii uszkodzonych obiektów (fot. 5.31–5.37) można ocenić, że szkodliwość w skali GSIS-2017 w tym przypadku miała stopień V, czyli uszkodzenia konstrukcyjne niepowodujące zagrożenia stateczności całej konstrukcji nośnej budowli, ale mogące obniżyć ich odporność dynamiczną. Do szczegółowej analizy wybrano siedem budynków, w których uszkodzenia mieściły się w stopniu III, IV i V skali GSIS-2017. W czasie konstruowania skali GSI<sub>GZWKW</sub>-2012 takich pomiarów i takich szkód praktycznie nie udało się udokumentować. Na rysunku 5.16 przedstawiono izolinie przyspieszenia wyznaczone w strefie epicentralnej, natomiast na rysunku 5.17 wyznaczono izolinie prędkości drgań *PGV*<sub>Hmax</sub>. Na mapie prędkości zaznaczono również lokalizację analizowanych obiektów budowlanych.

Fotografie największych obserwowanych szkód po wstrząsie w dniu 30.09.2015 r. przedstawiono poniżej dla siedmiu epizodów.

#### Epizod 1 (budynek 1)

W epizodzie tym wystąpiło krzyżowe pęknięcie ściany południowej, widoczne od wewnątrz budynku oraz znaczne uszkodzenia ścian nośnych. Istniało zagrożenie dla bezpieczeństwa użytkowników budynku w przypadku ponownego wystąpienia silnych wstrząsów. Uszkodzenia w stopniu V intensywności drgań i parametry drgań również wskazały na stopień V:

- $PGV_{Hmax} = 0,092 \text{ m/s i } t_{Hv} = 1,1 \text{ s},$
- $PGA_{H10} = 2,3 \text{ m/s}^2 \text{ i } t_{Ha} = 1,0 \text{ s.}$



Fot. 5.31. Krzyżowe pęknięcia ściany południowej widoczne od wewnątrz i od zewnątrz budynku, znaczne uszkodzenia ścian nośnych (Muszyński i in., 2015)

#### Epizod 2 (budynek 2)

W epizodzie tym zaobserwowano awarię konstrukcji dachu, zniszczenie dużych fragmentów ścianek kolankowych, silne uszkodzenia ściany zewnętrznej pomieszczenia na poddaszu wraz z odspojeniem rozległych fragmentów tynku, silne uszkodzenia ścian budynku, ścięcie kominów z ich niewielkim przemieszczeniem.

Uszkodzenia w stopniu V intensywności drgań i parametry drgań wskazały na stopień V pomiarowej intensywności w skali GSIS-2017:

- $PGV_{Hmax} = 0,097 \text{ m/s i } t_{Hv} = 1,1s$ ,
- $PGA_{H10} = 2,35 \text{ m/s}^2 \text{ i } t_{Ha} = 1,0 \text{ s.}$



Fot. 5.32. Silne uszkodzenie ścian budynku i odspojenie rozległych fragmentów tynku (a), uszkodzenie konstrukcji dachu (b) (Muszyński i in., 2015)

#### Epizod 3 (budynek 3)

W epizodzie tym zaobserwowano ścięty komin i uszkodzone pokrycie dachowe, zniszczenie samonośnych konstrukcji kominów. Stwierdzono zagrożenie dla bezpieczeństwa użytkowników budynku – w trakcie wstrząsu obserwowano spadanie cegieł ze ściętego komina i dachówek.

Uszkodzenia mieściły się w stopniu IV intensywności drgań, natomiast zagrożenie w stopniu V intensywności (spadające cegły). Parametry drgań wskazywały na stopień V pomiarowej intensywności w skali GSIS-2017:

•  $PGV = 0,105 \text{ m/s i } t_{Hv} = 1,0 \text{ s},$ 

•  $PGA = 2,6 \text{ m/s}^2 \text{ i } t_{Ha} = 0,95 \text{ s.}$ 



Fot. 5.33. Ścięty komin i uszkodzone pokrycie dachowe (Muszyński i in., 2015)

### Epizod 4 (budynek 4)

W epizodzie tym zaobserwowano silne uszkodzenia ścian budynku, uszkodzenia elementów wykończeniowych (gzymsów), pęknięcia i odspojenia tynku naroża ścian i naroży otworów okiennych, pęknięcia i przemieszczenia trzonu kominowego pod dachem, poluzowanie cegieł komina. Stwierdzono tymczasowe zagrożenie dla bezpieczeństwa użytkowników budynku – odpadanie naruszonego gzymsu.



**Fot. 5.34.** Silne uszkodzenia ścian budynku, uszkodzenia elementów wykończeniowych (gzymsów), pęknięcia i odspojenia tynku naroża ścian i naroży otworów okiennych (a), pęknięcia i przemieszczenia trzonu kominowego pod dachem (b) (Muszyński i in., 2015)

Uszkodzenia mieściły się w stopniu IV i V intensywności drgań, parametry drgań również wskazywały na stopień V pomiarowej intensywności w skali GSIS-2017:

- $PGV = 0,100 \text{ m/s i } t_{Hv} = 1,05 \text{ s},$
- $PGA = 2,3 \text{ m/s}^2 \text{ i } t_{Ha} = 0,95 \text{ s.}$

## Epizod 5 (budynek 5)

W epizodzie tym zaobserwowano silne pęknięcia ścian w narożu spiżarni, uszkodzenia trzonów kominowych poniżej powierzchni dachu.

Uszkodzenia mieściły się w stopniu V/IV intensywności drgań. Parametry drgań wskazywały na stopień V pomiarowej intensywności w skali GSIS-2017:

- $PGV = 0,084 \text{ m/s i } t_{Hv} = 1,1 \text{ s},$
- $PGA = 2,1 \text{ m/s}^2 \text{ i } t_{Ha} = 1,0 \text{ s.}$



Fot. 5.35. Silne pęknięcia ścian w narożu spiżarni (a), uszkodzenia trzonów kominowych poniżej powierzchni dachu (b) (Muszyński i in., 2015)

### Epizod 6 (budynek 6)

W epizodzie tym zaobserwowano pęknięcie i przesunięcie muru komina ceglanego nad dachem.

Uszkodzenia mieściły się w stopniu III/IV intensywności drgań. Parametry drgań wskazały na początek stopnia V pomiarowej intensywności w skali GSIS-2017:

- $PGV = 0,072 \text{ m/s i } t_{Hv} = 1,2 \text{ s},$
- $PGA = 1,75 \text{ m/s}^2 \text{ i } t_{Ha} = 1,0 \text{ s.}$



Fot. 5.36. Pęknięcie i przesunięcie muru komina ceglanego nad dachem (Muszyński i in., 2015)

#### Epizod 7 (budynek 7)

W epizodzie tym zaobserwowano zarysowanie i pęknięcie ściany wewnętrznej i odspojenie tynku.

Uszkodzenia mieściły się w stopniu III intensywności drgań. Parametry drgań wskazywały, że potencjalne szkody w budynku można zaliczyć do stopnia V pomiarowej intensywności sejsmicznej w skali GSIS-2017:

- $PGV = 0.09 \text{ m/s i } t_{Hv} = 1.1 \text{ s},$
- $PGA = 2,1 \text{ m/s}^2 \text{ i } t_{Ha} = 1,0 \text{ s.}$



Fot. 5.37. Zarysowanie i pęknięcie ściany wewnętrznej (a), odspojenie tynku (b) (Muszyński i in., 2015)

Przedstawiona analiza wstrząsu w dniu 30.09.2015 r. o energii 9E8 J wskazała na dobrą zgodność makroskopowo obserwowanych szkód w budynkach z intensywnością sejsmiczną wyznaczaną według skali GSIS-2017 z parametrów drgań podłoża i pozytywnie zweryfikowała kryteria przyjęte w tej skali. Praktycznie nie miała miejsca sytuacja, w której obserwowano określone uszkodzenia obiektów po wstrząsie, a parametry drgań nie wskazałyby możliwości ich wystąpienia. Większa część populacji budynków nie uległa żadnym uszkodzeniom w strefie drgań epicentralnych. Istnienie tej reguły obserwuje się również po innych silnych wstrząsach indukowanych eksploatacją pokładów węgla. Największe uszkodzenia obserwowano w strefie epicentralnej wstrząsu (południowo-centralna część Żarek) i najczęściej w budynkach w złym stanie technicznym, poddanych deformacjom ciągłym w zakresie III–V kategorii lub w budynkach o dużym naturalnym zużyciu. Należy podkreślić, że praktycznie wszyscy mieszkańcy znajdujący się w czasie wstrząsu w dniu 30.09.2015 r. w Żarkach odczuli wstrząs bardzo silnie i większość z nich mocno wystraszyła się i czuła się zagrożona z powodu spadających cegieł lub dachówek.

5.2.3.3. Wyniki weryfikacji skali dla wstrząsu, który wystąpił w Zagłębiu Saary w Niemczech w dniu 23.02.2008 r., o magnitudzie  $M_L = 4,1$ 

W dniu 23.02.2008 r. miał miejsce bardzo silny wstrząs indukowany eksploatacją górniczą w Zagłębiu Saary w pobliżu Saarbrücken w Niemczech. Epicentrum wstrząsu znajdowało się w pobliżu miejscowości Lebach, a jego magnituda wynosiła  $M_L$  = 4,1. W wyniku drgań od tego wstrząsu w wielu domach popękały ściany i poważnie zostały uszkodzone niektóre kościoły. W strefie epicentralnej zarejestrowano amplitudy prędkości drgań  $PGV_{Hmax}$  = 94 mm/s (Alber i Fritschen, 2010). Wstrząs był odczuwany na dużym obszarze. Sejsmiczność była obserwo-

wana przez sieć sejsmologiczną składającą się z 40 stacji pomiarowych. Epicentra wstrząsów, w tym przedmiotowego wstrząsu o magnitudzie 4,1, przedstawia rysunek 5.18.



**Rys. 5.18.** Sejsmiczność w Zagłębiu Saary – epicentra ognisk wstrząsów od roku 2000, w tym wstrząsu w dniu 23.02.2008 r., o magnitudzie  $M_L$  = 4,1 (COMEX, 2017)

Przykładowe uszkodzenia po zaistniałym wstrząsie w jednym z kościołów przedstawia fotografia 5.38. Na schodach widoczne są odspojone i oderwane duże fragmenty gzymsów. Takie skutki stanowią zagrożenie dla bezpieczeństwa ludzi i można je zaklasyfikować do stopnia V w skali GSIS-2017. Zarejestrowane amplitudy prędkości drgań  $PGV_{Hmax}$  = 94 mm/s klasyfikują ten wstrząs również do stopnia V intensywności sejsmicznej.

Przykład wstrząsu w Zagłębiu Saary również pozytywnie weryfikuje ocenę skutków drgań na podstawie skali empirycznej GSIS-2017.

Wstrząsy w Zagłębiu Saary analizowano, biorąc pod uwagę ich ocenę dokonaną przy użyciu skali MSIIS-15 (ang. *Mining Seismic Instrumental Intensity Scale*), opracowanej dla sejsmiczności indukowanej podziemną eksploatacją węgla kamiennego, w ramach realizacji projektu europejskiego finansowanego przez

RFCS (Fundusz Badawczy Węgla i Stali) o akronimie COMEX. W tym opracowaniu do weryfikacji skali GSIS-2017 wykorzystano ogólnodostępne informacje o tym projekcie (COMEX, 2017; Mutke i in., 2015b).



**Fot. 5.38.** Uszkodzenia po wstrząsie w dniu 23.02.2008 r., o magnitudzie  $M_L$  = 4,1; odspojenie i odpadnięcie dużych fragmentów gzymsów w jednym z kościołów zlokalizowanych w strefie epicentralnej wstrząsu (COMEX, 2017)

5.2.3.4. Podsumowanie weryfikacji

Wyniki weryfikacji pozwalają na następujące stwierdzenia:

- Uszkodzenia obserwowano jedynie w strefie epicentralnej wstrząsów, gdzie największe drgania wywoływane były falami bezpośrednimi typu S. Populacja obiektów uszkodzonych nie przekraczała maksymalnie 15%. Większa część populacji budynków nie uległa żadnym uszkodzeniom w strefie drgań epicentralnych, nawet w stopniu IV lub V pomiarowej intensywności sejsmicznej.
- Największe uszkodzenia obserwowano w strefie epicentralnej wstrząsów w budynkach w złym stanie technicznym, poddanych wcześniej deformacjom ciągłym w zakresie III–V kategorii lub w obiektach budowlanych o dużym naturalnym zużyciu. Należy zwrócić uwagę, że w pewnych sytuacjach nawet jeśli uszkodzenia występowały zgodnie z opisem skutków w stopniu III skali GSIS-2017, czyli w elementach niekonstrukcyjnych i elewacyjnych, a wystąpiło zagrożenie z powodu spadających cegieł lub dachówek, to wstrząs kwalifikuje się do wyższego stopnia IV intensywności. W takich sytuacjach klasyfikacja pomiarowej intensywności, dokonywana na podstawie parametrów zarejestrowanych drgań, prawidłowo wskazywała zagrożenie.

- W dalekich odległościach poza strefą epicentralną drgania rejestrowano z użyciem sejsmometrów Górnośląskiej Regionalnej Sieci Sejsmologicznej GIG. Od najsilniejszych wstrząsów drgania były odczuwalne niemal w całym obszarze GZW. W polu dalekim drgania charakteryzowały się niską częstotliwością 1–2 Hz i amplitudami prędkości drgań 0,1–4 mm/s i pochodziły od fal powierzchniowych. Drgania w polu dalekim nie spowodowały żadnych uszkodzeń w obiektach budowlanych, nie zgłoszono też uszkodzeń licznych obiektów zabytkowych wrażliwych na drgania, a posadowionych w obszarze GZW.
- Zaobserwowano, że budynki sprawdzone i przygotowane na oddziaływanie zagrożeń związanych ze wstrząsami górniczymi, lepiej reagują na drgania (np. naprawione kominy po przeglądzie technicznym, elementy architektoniczne).

Przeprowadzona w ramach weryfikacji skali analiza kilkuset przypadków uszkodzeń budynków po najsilniejszych wstrząsach w GZW (kopalnia Janina: 9E8 J, 6E8 J, 1E9 J; kopalnia Marcel 1E8 J; kopalnia Wujek-Śląsk: 8E8 J, 4E9 J i kopalnia Bobrek 3E8 J) wykazała wpływ rozwiązań konstrukcyjnych na rodzaj uszkodzeń występujących w wyniku działania wstrząsu (budynki tradycyjne, tradycyjne-ulepszone, budynki o konstrukcji ścianowej betonowej i żelbetowej, budynki szkieletowe o konstrukcji żelbetowej lub stalowej). Znaczący wpływ na rodzaj uszkodzeń miał stan techniczny budynku i jego naturalne zużycie. Analiza rodzaju uszkodzeń pozwoliła na zmodyfikowanie dotychczasowych granic stopni intensywności w zakresie stopni związanych z uszkodzeniami elementów konstrukcyjnych i/lub zagrożeniem użytkowania budynków i bezpieczeństwem mieszkańców.

Przeprowadzona weryfikacja skali GSIS-2017 w oparciu o najsilniejsze wstrząsy indukowane eksploatacją górniczą w GZW wykazała, że intensywność sejsmiczna wyznaczana z danych pomiarowych wykazuje dobrą korelację z obserwowanymi skutkami drgań w budynkach i/lub z zagrożeniem użytkowania budynków przez mieszkańców.

## 6. Monitorowanie wstrząsów i mapy prognozowanych drgań

Monitoring sejsmometryczny stanowi podstawę badania parametrów drgań obserwowanego obszaru, a następnie opracowania i wdrożenia bezpośrednich i pośrednich metod oceny oddziaływania sejsmicznego. Metody pośrednie są oparte na lokalnych relacjach tłumienia drgań (GMPE) i sporządzonych z wykorzystaniem wyników monitoringu sejsmometrycznego mapach drgań sejsmicznych. Dają one również możliwość uzyskania rejestracji cyfrowej wstrząsów sejsmicznych, niezbędnych do wykonywania obliczeń i analizy pracy konstrukcji obiektów budowlanych poddanych obciążeniom dynamicznym od wstrząsów górniczych.

# 6.1. Sejsmiczność indukowana eksploatacją złóż w polskich zagłębiach górniczych

W Polsce sejsmiczność indukowana eksploatacją złóż występuje w czterech zagłębiach górniczych, tj. w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym (GZW), Bełchatowskim Zagłębiu Węgla Brunatnego (BZWB), Lubelskim Zagłębiu Węglowym (LZW) oraz Legnicko-Głogowskim Okregu Miedziowym (LGOM) (Teisseyre, 1983; Gibowicz i Kijko, 1994). Obszary GZW i LGOM należą do jednych z najbardziej aktywnych sejsmicznie rejonów górniczych na świecie. Poziom intensywności zjawisk sejsmicznych jest bardzo zróżnicowany: od niewyczuwalnych przez ludzi do silnych o charakterze słabych trzęsień ziemi. W GZW obserwuje się wstrząsy zlokalizowane bezpośrednio w otoczeniu frontu prowadzonej eksploatacji pokładów wegla lub rud miedzi (tzw. sejsmiczność indukowana bezpośrednio eksploatacją górniczą - wstrząsy eksploatacyjne) (Marcak i Zuberek, 1994; Sokoła-Szewioła, 2011) i wstrząsy o źródle występującym w strefach większych uskoków tektonicznych (tzw. sejsmiczność aktywowana eksploatacją górniczą – wstrząsy regionalne) (Kijko, Drzęźla i Stankiewicz, 1987). Wstrząsy z pierwszej grupy są zdecydowanie bardziej liczne, o energii nieprzekraczającej 10<sup>7</sup> J, natomiast druga grupa to wstrząsy mniej liczne, charakteryzujące się często wysoką energią z zakresu 10<sup>8</sup>–10<sup>9</sup> J (magnituda od 3,0 do ponad 4,0) (Gibowicz, 1989; Idziak, Teper i Zuberek, 1999; Gibowicz, 2002; Zembaty, 2002; Stec, 2007; Idziak, 2010; Marcak i Mutke, 2013; Mutke i Dubiński, 2016; Rudziński, Cesca i Lizurek, 2016). Wstrząsy górnicze charakteryzują się mniejszą energią sejsmiczną i magnitudą, płytszą lokalizacją ognisk sejsmicznych, wyższą częstotliwością głównej fazy drgań na powierzchni oraz krótszymi czasami trwania niż trzęsienia ziemi.

Ze względu na udział wyższych częstotliwości w głównej fazie drgań sygnału sejsmicznego od wstrząsu górniczego w porównaniu do częstotliwości drgań od trzęsień ziemi, występuje znaczna różnica wartości ilorazu szczytowych amplitud przyspieszenia *PGA*, do szczytowych amplitud prędkości drgań *PGV*. Iloraz ten jest zdecydowanie mniejszy dla trzęsień ziemi niż dla wstrząsów sejsmicznych indukowanych eksploatacją górniczą. Relacja ta jest widoczna na rysunku 6.1.



**Rys. 6.1.** Zależność między wypadkowymi przyspieszeniami i prędkościami drgań składowych poziomych od wstrząsów regionalnych i eksploatacyjnych w GZW, najsilniejszych wstrząsów w LGOM i BZWB oraz trzęsienia ziemi w L'Aquila w dniu 6.04.2009 r.

Zarówno rodzaj stwierdzonych uszkodzeń budynków (uszkodzenia tynku, odpadanie sterczyn, zarysowanie ścian, poluzowanie dachówek czy uszkodzenie kominów) powstałych w wyniku drgań sejsmicznych wywołanych wstrząsami górniczymi, jak i ich ilość (niewielka) wskazują na mniejszą szkodliwość drgań górniczych od trzęsień ziemi. W zasadzie nie obserwuje się uszkodzeń konstrukcyjnych obniżających nośność budynku.

Różnica wartości charakterystycznych parametrów drgań gruntu od wstrząsów górniczych i od trzęsień ziemi oraz obserwowanych uszkodzeń obiektów budowlanych powoduje, że szkodliwość wstrząsów górniczych nie może być obecnie oceniana z wykorzystaniem skal intensywności sejsmicznej stosowanych w trzęsieniach ziemi.

## Charakterystyczne parametry sejsmiczności w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym

Sejsmiczność w GZW charakteryzuje występowanie wstrząsów o energii sejsmicznej osiągającej 10<sup>9</sup> J (magnituda lokalna powyżej 4,0).

Parametry drgań od najsilniejszych wstrząsów rejestrowane na powierzchni GZW osiągały następujące wartości (Mutke i in., 2018):

- szczytowe amplitudy prędkości drgań gruntu do 0,1 m/s,
- szczytowe amplitudy przyspieszenia drgań w paśmie do 10 Hz do 2,8 m/s<sup>2</sup>,
- częstotliwość dominująca głównej fazy drgań od 0,7 do 15 Hz,
- czas trwania drgań od 0,5 do 16 s.

### Charakterystyczne parametry sejsmiczności w Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym

Sejsmiczność w LGOM charakteryzuje występowanie wstrząsów o energii podobnej jak w GZW; najsilniejsze wstrząsy osiągają energię rzędu 10<sup>9</sup> J, a magnituda lokalna wynosi powyżej 4,0. Parametry drgań rejestrowane na powierzchni od najsilniejszych wstrząsów osiągały następujące wartości (Dubiński i in., 2009b):

- szczytowe amplitudy prędkości drgań gruntu do 0,101 m/s,
- szczytowe amplitudy przyspieszenia drgań do 2,8 m/s<sup>2</sup>,
- szczytowe amplitudy przyspieszenia drgań w paśmie do 10 Hz do 2,6 m/s<sup>2</sup>
- częstotliwość dominująca głównej fazy drgań od 0,6 do 25 Hz,
- czas trwania drgań od 1,0 do 18 s.

## Charakterystyczne parametry sejsmiczności w Bełchatowskim Zagłębiu Węgla Brunatnego

Silne wstrząsy sejsmiczne występują również w Bełchatowskim Zagłębiu Węgla Brunatnego. Są to zjawiska aktywowane przez eksploatację węgla w strefach lokalnej tektoniki w rowie bełchatowskim. Silne wstrząsy występują tutaj rzadziej niż w GZW i w LGOM, jednak energia sejsmiczna osiąga wartości rzędu 10<sup>10</sup> J (magnituda lokalna rzędu 4,5). Sieć sejsmometryczna w KWB Bełchatów jest uboższa niż w GZW i LGOM, co nie pozwoliło do tej pory na zarejestrowanie amplitud drgań w samym epicentrum. Dotychczas zarejestrowane najwyższe

amplitudy prędkości drgań wynosiły PGV = 35 mm/s, na stanowisku w odległości epicentralnej  $r_e = 2,2 \text{ km}$ . Czasy trwania drgań najsilniejszych wstrząsów w KWB Bełchatów są zdecydowanie dłuższe niż w GZW i w LGOM, i wynoszą do 30 s (Mutke i in., 2019b).

### Charakterystyczne parametry sejsmiczności w Lubelskim Zagłębiu Węglowym

Sejsmiczność w LZW ma na razie bardzo krótką historię. Pierwszą aparaturę typu AMAX-GSI zainstalowano tam w roku 2015 (trzy stanowiska) i od tego czasu regularnie rejestrowane są górnicze wstrząsy sejsmiczne, jednak do roku 2018 były to zjawiska dużo słabsze niż w GZW. Parametry amplitudy szczytowych prędkości drgań nie przekroczyły w latach 2015–2018 wartości  $PGV_{Hmax} = 0,010$  m/s, co w skali GSIS-2017 oznacza maksymalnie stopień I intensywności sejsmicznej. Najwyższe magnitudy wstrząsów w LZW osiągały wartość  $M_L = 2,9$  (według https://tcs-ah-epos.eu/#episode: BOGDANKA).

#### 6.2. Aparatura pomiarowa

Rejestracje drgań prowadzone są z zastosowaniem aparatury o zapisie cyfrowym. W celu zapewnienia wysokiej jakości rejestracji drgań i możliwości stosowania specjalistycznych procedur ich przetwarzania i interpretacji wyników, liczba próbek zarejestrowanych drgań nie powinna być mniejsza niż 200 próbek/s, a amplitudy drgań powinny być opisywane w jednostkach fizycznych.

Ze względu na charakterystykę drgań indukowanych lub aktywowanych przez eksploatację górniczą i bezpieczeństwo danych, aparatura pomiarowa powinna zapewniać pełną rejestrację:

- **amplitud prędkości drgań** *PGV* w zakresie od 0,0005 do 0,2 m/s, w paśmie częstotliwości *f* od 0,5 do 100 Hz,
- **amplitud przyspieszenia drgań** *PGA* w zakresie od 0,01 do 3,0 m/s<sup>2</sup>, w paśmie częstotliwości *f* od 0,5 do 100 Hz,
- czasu przebiegu całego wstrząsu zapisanego w jednym zbiorze (wstrząs wyzwolony automatycznie); czas ten ustawiony na stałe nie może być krótszy niż 10 s (dla rejestracji w strefie epicentralnej),
- **ciągłego** przebiegu drgań zachowanego w buforze rejestratora przez okres co najmniej 10 dni.

Aparatura pomiarowa powinna posiadać aktualną kalibrację (charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe) wszystkich kanałów rejestrujących. Kalibrację kanałów sejsmicznych należy sprawdzać przynajmniej raz na dwa lata. Dokument kalibracyjny należy przechowywać wraz z dziennikiem zarejestrowanych zjawisk sejsmicznych.

Oprogramowanie aparatury powinno umożliwiać eksport sejsmogramów i akcelerogramów w ogólnodostępnym formacie ASCII.

#### 6.3. Instalowanie odbiorników drgań

Stanowisko pomiarowe przeznaczone do prowadzenia monitoringu sejsmometrycznego powinno składać się z trzech odbiorników (mierników) drgań usytuowanych we wzajemnie prostopadłych kierunkach (dwa w poziomie i jeden pionowy). Pomiar sejsmometryczny parametrów drgań gruntu, w przypadku stosowania empirycznej skali oceny skutków drgań GSIS-2017, wymaga zainstalowania odbiorników drgań bezpośrednio w gruncie lub w budynkach, dla których funkcja przejścia drgań *F* z podłoża na fundament obiektu jest zbliżona do jedności (w granicach do 30%) dla zakresu częstotliwości od 1,0 do 10 Hz. Z reguły są to małe budynki jednorodzinne, pomieszczenia gospodarcze czy garaże.

Zalecanym sposobem instalowania odbiorników w gruncie jest ich posadowienie i instalacja na specjalnych betonowych postumentach, trwale związanych z podłożem lub w płytkich (do kilku metrów) otworach wiertniczych. W przypadku instalacji w budynkach, dla których funkcja przejścia drgań *F* z podłoża na fundament obiektu jest zbliżona do jedności, dopuszczalne jest instalowanie odbiorników drgań w piwnicach, na odsłoniętym w nich podłożu gruntowym lub bezpośrednio nad fundamentem do ściany nośnej, w sztywnym węźle konstrukcji. Przykład montażu stanowiska sejsmometrycznego w otworze i w studzience przedstawia fotografia 6.1, a fotografia 6.2 – instalację czujników na specjalnie przygotowanym postumencie w jednym z pomieszczeń Górnośląskiego Obserwatorium Geofizycznego (GOG) w Głównym Instytucie Górnictwa w Katowicach (Mutke i in., 2019a).



Fot. 6.1. Stanowisko sejsmometryczne z instalacją czujników w otworze wiertniczym i w studzience na gruncie



Fot. 6.2. Stanowisko sejsmometryczne z instalacją czujników na postumencie związanym z podłożem, wykonanym w piwnicy budynku Górnośląskiego Obserwatorium Geofizycznego

W przypadku montażu czujników na stanowisku w budynku, podstawowymi elementami mogącymi powodować zmianę odpowiedzi spektralnej w układzie grunt-fundament jest sam obiekt budowlany i jego posadowienie w gruncie oraz charakterystyka drgań dochodzących do obiektu. Jeśli drgania są niskoczęstotliwościowe, zdecydowanie niższe od częstotliwości drgań własnych obiektów budowlanych (np. jak ma to miejsce w przypadku trzęsień ziemi), to z reguły rejestracje drgań w gruncie i na fundamencie obiektu są bardzo do siebie zbliżone. W takiej sytuacji nie ma istotnych różnic w obliczanych bezwzględnych spektrach odpowiedzi. W przypadku wstrząsów górniczych sytuacja jest inna i budynki o niskiej częstotliwości drgań własnych, szczególnie poniżej 5 Hz, mogą powodować istotne tłumienie drgań z gruntu. Dlatego funkcja przejścia F liczona w domenie częstotliwości jako iloraz bezwzględnych spektrów odpowiedzi dla rejestracji na gruncie i na fundamencie, jest odmienna dla wstrząsów o różnych charakterystykach częstotliwościowych drgań i przede wszystkim może być odmienna dla różnych obiektów budowlanych. Wykazały to pomiary i obliczenia przeprowadzone w licznych budynkach usytuowanych w Polkowicach i w miejscowościach Szklary Górne i Sucha Górna (Dubiński i in., 2003b). Poniżej przedstawiono dwa przykłady rejestracji wstrząsów górniczych na gruncie i na fundamencie małego budynku mieszkalnego jednorodzinnego (rys. 6.2) oraz na gruncie i na fundamencie dużego budynku pięciokondygnacyjnego z wielkiej płyty (rys. 6.3).



**Rys. 6.2.** Rejestracja wstrząsu w dniu 10.10.2002 r. o energii sejsmicznej  $E = 3 \cdot 10^8$  J i z odległości epicentralnej  $r_e = 1950$  m, na gruncie i na fundamencie (a) i funkcja przejścia drgań z gruntu na fundament budynku mieszkalnego jednorodzinnego (b) (Dubiński i in., 2003b)

Funkcja przejścia drgań z gruntu na fundament dla budynku jednorodzinnego podpiwniczonego przedstawiona na rysunku 6.2b wskazuje, że w zakresie częstotliwości drgań od 1 do 10 Hz współczynnik ten zmienia się od 0,9 do 1,0. W budynkach jednorodzinnych z reguły nie występuje problem wzmacniania drgań na fundamencie i funkcja przejścia jest zbliżona do F = 1. Oznacza to, że w spektrach projektowych czynnik ten nie odgrywa takiej roli jak dla wysokich budynków kubaturowych.

Funkcja przejścia drgań z gruntu na fundament dla budynku pięciokondygnacyjnego z wielkiej płyty przedstawiona na rysunku 6.3b wskazuje, że w zakresie częstotliwości drgań od 1 do 10 Hz współczynnik ten zmienia się od 0,4



**Rys. 6.3.** Rejestracja wstrząsu w dniu 27.01.2001 r. o energii sejsmicznej  $E = 4,3 \cdot 10^7$  J w gruncie i na fundamencie (a) oraz funkcja przejścia drgań z gruntu na fundament budynku pięciokondygnacyjnego z wielkiej płyty (b) (Dubiński i in., 2003b)

do 0,6. Powyższy przykład pokazuje, że na fundamencie tego budynku zarówno szczytowe wartości *PGA*, jak i amplitudy widmowe zostały stłumione około dwukrotnie. Taki budynek nie spełnia warunków dla zainstalowania stanowiska sejsmometrycznego w celu zastosowania wyników pomiarów do oceny intensywności sejsmicznej według skali GSIS-2017.

#### 6.4. Interpretacja zapisów drgań zarejestrowanych na powierzchni

Do oceny intensywności drgań wywołanych wstrząsami górniczymi w polskich zagłębiach węglowych Komisja ds. Ochrony Powierzchni przy Wyższym Urzędzie Górniczym zaleca stosowanie skali empiryczno-pomiarowej GSIS-2017. Skala ta uwzględnia zarówno specyficzne cechy charakterystyki rejestrowanych drgań w GZW i LZW oraz obiektów budowlanych zlokalizowanych na obszarze tych zagłębi, jak również empirycznie wyznaczone granice wpływu oddziaływania wstrząsów górniczych w obiektach budowlanych, liniowej podziemnej infrastrukturze technicznej oraz intensywności odczuwania drgań przez ludzi. Stosowanie empiryczno-pomiarowej skali makrosejsmicznej GSIS-2017 wymaga określenia w procesie interpretacyjnym, odpowiednich parametrów charakteryzujących drgania, przede wszystkim w odniesieniu do składowych poziomych.

Parametry wstrząsów niezbędne do oceny stopni intensywności drgań w skali GSIS-2017 to maksymalna wartość prędkości drgań poziomych  $PGV_{Hmax}$  wyznaczona jako wypadkowa poziomego maksimum długości wektora, wyrażona w m/s – wzór (2.13) i czas trwania składowej poziomej prędkości drgań  $t_{Hv}$  – wzór (2.15). W przypadku braku możliwości oceny intensywności drgań z zastosowaniem parametru amplitudy prędkości (np. dla danych historycznych, które nie opisują parametru  $PGV_{Hmax}$ ) można stosować maksymalne przyspieszenie poziomych drgań gruntu w paśmie do 10 Hz  $PGA_{H10max}$ , wyznaczone jako wypadkowa poziomego maksimum długości wektora, wyrażona w m/s<sup>2</sup> – wzór (2.14) oraz czas trwania składowej poziomej przyspieszenia drgań  $t_{Ha}$  – wzór (2.16). W celu uzyskania wartości  $PGA_{H10}$  sygnał przyspieszeniowy musi być odfiltrowany filtrem dolnoprzepustowym od sygnałów powyżej częstotliwości 10 Hz. Powyższa procedura obliczeniowa pozwala na uniezależnienie się od kierunkowości instalacji odbiorników drgań.

Jeżeli wartość prędkości drgań poziomych  $PGV_{Hmax}$  jest obliczana w wyniku operacji całkowania akcelerogramu (zapisu przyspieszenia drgań), należy zachować odpowiednią procedurę przygotowania sygnału przyspieszenia drgań. Sygnał ten powinien być odfiltrowany przed całkowaniem z zakresu niskich częstotliwości (nie wyższych niż 0,5 Hz). W niektórych przypadkach niezbędne może okazać się również skorygowanie trendu linii bazowej w zapisie *baseline correction*. W przypadku obliczania czasu trwania drgań metodą całkową – wzory (2.15) i (2.16), wskazane jest zdefiniowanie szumu i ustalenie stosunku sygnału do szumu (np. na poziomie 2.0). Szum powinien być określany z rejestracji przed wejściem fali *P*, a całkowanie odbywa się do momentu, aż sygnał spadnie poniżej stosunku sygnału do szumu. Wynik całkowania w formie różnicy czasu, gdy całka osiąga 5% i 95%, jest szukanym czasem trwania wstrząsu górniczego.

## 6.5. Archiwizacja wyników obserwacji sejsmometrycznych

Nieprzetworzone przebiegi drgań związanych z zarejestrowanymi wstrząsami górniczymi należy archiwizować na nośnikach cyfrowych. Nośniki te powinny być wyszczególnione i opisane w dzienniku rejestrowanych zjawisk sejsmicznych. Rejestr ten powinien zawierać informacje dotyczące:

- typu aparatury pomiarowej,
- dokumentu kalibracyjnego,
- miejsca instalacji odbiorników drgań,
- budowy nadkładu w miejscu instalacji mierników drgań,
- profilu prędkościowego fal poprzecznych w miejscu lokalizacji mierników drgań,
- archiwizowanych oryginalnych przebiegów drgań,
- daty i czasu zarejestrowanych drgań wywołanych wstrząsami górniczymi,
- współrzędnych ognisk wstrząsów (co najmniej epicentrum) i ich energii sejsmicznej  $E_{s,s}$
- wyników uzyskanych w procesie interpretacyjnym dotyczących zarejestrowanych parametrów drgań, do których należy zaliczyć: maksymalne wartości wypadkowej amplitudy prędkości drgań poziomych *PGV<sub>Hmax</sub>* i czasu trwania wstrząsu obliczonego z przebiegu prędkościowego *t<sub>Hv</sub>*, stopnia intensywności w skali GSIS-2017,
- innych uzupełniających danych i parametrów (np. amplitudy pikowej prędkości drgań składowej pionowej  $PGV_z$ , maksymalne wartości wypadkowej amplitudy przyspieszeń drgań poziomych w paśmie do 10 Hz  $PGA_{H10}$ , czasu trwania wstrząsu obliczonego z przebiegu przyspieszeniowego  $t_{Ha}$ ).

Rejestr zjawisk sejsmicznych powinien być zachowany przez zakłady górnicze do końca ich funkcjonowania, a po likwidacji zakładów przekazany do Archiwum Dokumentacji Mierniczo-Geologicznej w Wyższym Urzędzie Górniczym.

# 6.6. Prowadzenie obserwacji skutków wstrząsów w obiektach budowlanych i ich dokumentowanie

Określenie rzeczywistych skutków wstrząsów górniczych, które wystąpiły w budynkach, jest najczęściej zadaniem bardzo trudnym (Barański i in., 2014). Skutki te nakładają się zazwyczaj na powstałe wcześniej uszkodzenia obiektów pod wpływem czynników ogólnobudowlanych, jak również na skutki oddziaływania górniczych deformacji podłoża, będące następstwem prowadzonej podziemnej eksploatacji górniczej. Określenie rzeczywistych skutków wstrząsów górniczych, po wykazaniu związku przyczynowo-skutkowego między wstrząsem a szkodą, jest niezbędne dla ustalenia odpowiedzialności przedsiębiorcy górniczego i określenia sposobu usunięcia powstałej szkody. Zakres przeglądu stanu technicznego budynków (oględzin zgłoszonych szkód) po zaistniałym wstrząsie, powinien zależeć przede wszystkim od określonego po tym wstrząsie stopnia intensywności drgań w skali GSIS-2017.

Prowadzenie przeglądów powinno odbywać się w następującej kolejności:

- zgłoszenia dotyczące skutków zagrażających bezpieczeństwu użytkowania obiektu,
- pozostałe zgłoszenia dotyczące skutków w strefach oddziaływania wstrząsu,
- obiekty bez zgłoszonych skutków budynki o odporności dynamicznej niższej od stwierdzonej intensywności drgań i budynki (obiekty) o szczególnym przeznaczeniu.

W każdej z ww. grup przeglądy należy rozpoczynać od obiektów znajdujących się w miejscach, gdzie stwierdzono najwyższy stopień intensywności drgań.

Informacja o uszkodzeniach obiektu budowlanego powstałych po wstrząsie górniczym powinna odnosić się do elementów niekonstrukcyjnych, elementów konstrukcyjnych oraz wyposażenia mieszkań.

Opis zaobserwowanych uszkodzeń powinien obejmować:

- uszkodzenia elementów niekonstrukcyjnych i wykończeniowych:
  - powiększanie się istniejących uszkodzeń,
  - pierwsze nowe uszkodzenia,
  - liczne uszkodzenia,
  - zniszczenia elementów;
- uszkodzenia elementów konstrukcyjnych:
  - powiększanie się istniejących uszkodzeń,
  - pierwsze nowe uszkodzenia,
  - duże uszkodzenia (np. pęknięcia i szczeliny na wskroś),
  - zniszczenia pojedynczych elementów;
- uszkodzenia wyposażenia mieszkań:
  - mebli,
  - sprzętu elektronicznego,
  - elementów ozdobnych mieszkania.

Zakres informacji gromadzonych na temat poszczególnych budynków powinien obejmować następujące rodzaje danych:

- dane o budynkach charakteryzujące geometrię bryły budynku, opis zastosowanych rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych, opis aktualnego stanu technicznego budynku z wyróżnieniem stopnia naturalnego zużycia obiektu oraz stanu jego uszkodzeń,
- dane o wpływach dokonanej eksploatacji górniczej, z uwzględnieniem czasu ich wystąpienia i zaistniałych wskaźników deformacji powierzchni.

W charakterystyce rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych budynku konieczne jest odnotowanie zabezpieczeń wprowadzonych w celu ochrony obiektu przed wpływami deformacji górniczych podłoża i zabezpieczeń budynków przed wpływami wstrząsów górniczych. W opisie stanu uszkodzeń budynku istotne jest, choć nie zawsze możliwe, rozróżnienie skutków wstrząsu górniczego od wcześniejszych uszkodzeń spowodowanych czynnikami ogólnobudowlanymi lub wpływami deformacji górniczych podłoża.

Dane pozyskane w trakcie przeprowadzanych przeglądów budynków narażonych na wpływy wstrząsów górniczych powinny być archiwizowane w sposób umożliwiający szybki i łatwy do nich dostęp.

## 6.7. Przedstawianie wyników prognozy oddziaływania sejsmicznego na powierzchnię

W przypadku, gdy dysponuje się bezpośrednim zapisem drgań, do oceny intensywności sejsmicznej według skali GSIS-2017 wystarczy nanieść zarejestrowaną wartość parametru amplitudy prędkości  $PGV_{Hmax}$  i czasu trwania  $t_{Hv}$ na wykres skali.

Z reguły występuje sytuacja, gdy nie dysponuje się bezpośrednio pomierzonymi parametrami drgań w miejscu prowadzonej oceny oddziaływania wstrząsu. W takim przypadku niezbędne do oceny parametry drgań prognozowane są z wykorzystaniem relacji tłumienia.

Przy uwzględnieniu skali oceny wpływu drgań GSIS-2017 prognoza powinna odnosić się do następujących parametrów:

- maksymalna prędkość drgań poziomych *PGV*<sub>Hmax</sub>, wyznaczona jako wypadkowe poziome maksimum długości wektora,
- czas trwania składowej poziomej prędkości drgań t<sub>Hv</sub>.

Przy dokonywaniu takiej oceny należy pamiętać, że krzywe regresji odnoszą się zwykle do szacowania średniej wartości amplitudy drgań (kwantyl rzędu 0,5). Przy prognozowaniu wartości amplitud drgań proponuje się podawać rozrzut średniej wartości kwantyla rzędu 0,84 lub w formie przedziałów ufności obliczonych z określonym prawdopodobieństwem (np. P = 0,84).

Prognoza oddziaływań sejsmicznych często jest wykonywana dla projektowanej eksploatacji górniczej. W takim przypadku niezbędne jest sporządzenie map prognozowanych drgań oraz mapy intensywności sejsmicznej według skali GSIS-2017, która jest miarą potencjalnych oddziaływań dynamicznych w obszarze prowadzonej eksploatacji pokładów węgla. Wykreślenie map polega na określeniu rozkładów wartości parametrów drgań gruntu (prędkości PGV<sub>Hmax</sub> lub przyspieszenia *PGA<sub>H10</sub>*), obliczonych z krzywej regresji dla trzech kolejnych przedziałów czasu (0–1,5 s; 1,5–3 s; > 3 s) trwania maksymalnej fazy drgań (odpowiednio  $t_{Hv}$  lub  $t_{Ha}$ ). W tabeli (lub na mapie w przypadku wykreślania izolinii) należy zaznaczyć rozrzut przeciętnych wartości. Prognoza regionalna uwzględnia wstrząsy najsilniejsze o charakterze tektonicznym i może być wyznaczona dla najmniej korzystnych czasów trwania drgań, tj. przy założeniu głównej fazy drgań o czasie trwania ponad 3 s. Do obliczenia izolinii określających prognozowane parametry drgań wykorzystywane są relacje tłumienia. Drgania rejestrowane w warstwie nadkładu w postaci gruntów niespoistych, o niskich prędkościach propagacji fali *S*, odbiegają od tych mierzonych na podłożu skalnym (twardym) i to zarówno w swej charakterystyce amplitudowej, jak i częstotliwościowej. Analiza tego zjawiska polega na ilościowym badaniu, na podstawie dokonanych rejestracji sejsmometrycznych, wpływu nadkładu gruntowego na zmianę wartości rejestrowanych amplitud prędkości drgań lub na zmianę kształtu wzorcowego spektrum odpowiedzi. Należy dążyć do sporządzenia mapy amplifikacji drgań w obszarze objętym prognozą i uwzględnienia jej w prognozie oddziaływań dynamicznych.

Współczynnik amplifikacji drgań gruntu w badanym obszarze zwykle wykazuje dużą zmienność, co wpływa znacząco na obraz amplitud drgań. W związku z tym maksymalne wartości amplitud prędkości drgań powierzchni terenu można wyznaczać za pomocą wzoru

$$PGV_{H\max} = PGV_{hrock} W_f \tag{6.1}$$

gdzie W<sub>f</sub> jest współczynnikiem podłoża (amplifikacji drgań).

Pewne zaburzenia w postaci niejednorodności geologicznych czy nieciągłości w formie uskoków i kierunkowość drgań, mogą dodatkowo zmieniać obraz falowy. W takiej sytuacji wskazane jest uwzględnienie rzeczywistych zapisów w prognozowanym empirycznie polu transmitowanych drgań falowych. Taki zabieg powoduje, że stabilizuje się i optymalizuje prognozę drgań w odniesieniu do rzeczywistych drgań pomierzonych. W tym celu wokół każdego punktu pomiarowego na powierzchni (o ile takim się dysponuje) wytyczono obszar o promieniu d = 250 m, w którym przyjmuje się stałą wartość  $PGV_{Hmax}$ , jaką

zarejestrowano na aparaturze. Natomiast w odległości *r* od punktu pomiarowego wartość drgań jest aproksymowana następująco (Mutke i in., 2017b)

$$PGV_{H}(r) = dPGV_{Hmax}(0) + (1 - d)PGV_{Hmax}(r)$$
(6.2)

gdzie:

 $PGV_{Hmax}(0)$  – wartość pomierzona w punkcie, w którym r = 0,

 $PGV_{Hmax}(r)$  – wartość obliczona ze wzorów aproksymacyjnych (relacji tłumienia dla drgań twardego podłoża) w odległości r od punktu obserwacyjnego (stacji sejsmometrycznej),

*d* = 250/*r* dla *r* > 250 m; *d* = 1 dla *r* < 250 m.

W kolejnym etapie, na podstawie powyższej prognozy drgań, wykreśla się mapę izolinii intensywności sejsmicznej *I*<sub>GSIS</sub>, zdefiniowanej według skali GSIS-2017.

Na rysunku 6.4 przedstawiono przykładową mapę prognozowanych izolinii amplitud prędkości drgań gruntu po wstrząsie górniczym o energii sejsmicznej 9E8 J. Wyniki przykładowych obliczeń  $PGV_H(r)$  dla wstrząsu o energii 9E8 J, przedstawione na rysunku 6.4, uwzględniają rzeczywistą wartość amplitud zarejestrowanych na pięciu stacjach sejsmicznych.



**Rys. 6.4.** Mapa amplitud prędkości drgań *PGV*<sub>H</sub>(*r*) dla wstrząsu regionalnego na obszarze GZW o energii sejsmicznej *E* = 9,0E+08 J

Na rysunku 65 przedstawiono przykładową mapę prognozowanej intensywności sejsmicznej według skali GSIS-2017 dla wstrząsu górniczego o energii sejsmicznej 9E8 J, wyznaczoną na podstawie mapy prędkości drgań.



**Rys. 6.5.** Mapa intensywności drgań według skali GSIS-2017 dla wstrząsu w dniu 11.08.2018 r., o energii sejsmicznej *E* = 9,0E+08 J; zaznaczono również granicę potencjalnej szkodliwości (granica oznaczona II+) i granicę potencjalnych pierwszych uszkodzeń konstrukcyjnych budynków o konstrukcji tradycyjnej i tradycyjnej-ulepszonej oraz dla budynków szkieletowych o konstrukcji żelbetowej i stalowej w dobrym stanie technicznym

# 6.8. Kierunki rozwoju oceny oddziaływania wstrząsów górniczych na powierzchnię

W ostatnich latach nastąpił znaczący postęp w zakresie monitorowania wstrząsów indukowanych eksploatacją złóż w polskich zagłębiach górniczych. Przedsiębiorstwa górnicze zakupiły aparaturę sejsmometryczną i rozmieściły ją na obszarach, na których obserwuje się sejsmiczność indukowaną (w sumie ponad 100 powierzchniowych stacji sejsmometrycznych). Prowadzony jest również monitoring sejsmometryczny przez jednostki naukowo-badawcze. W obszarze GZW działa Górnośląska Regionalna Sieć Sejsmologiczna GRSS

prowadzona przez Zakład Geologii i Geofizyki Głównego Instytutu Górnictwa, składająca się z 25 powierzchniowych stacji sejsmicznych. W obszarze LGOM działa sieć sejsmologiczna LUMINEOS prowadzona przez Instytut Geofizyki PAN.

Przedsiębiorstwa górnicze i Główny Instytut Górnictwa zainwestowały w rozwój metod oceny oddziaływania wstrząsów górniczych na powierzchnię. W wyniku tych badań powstały górnicze skale intensywności sejsmicznej dla obszaru LGOM (ostatnia wersja – skala GSI-2004/18) i dla obszaru GZW, LZW i BZWB (ostatnia wersja – skala GSIS-2017). Skale intensywności sejsmicznej wstrząsów górniczych pozwoliły na bardziej wiarygodną ocenę szkodliwego oddziaływania wstrząsów i uniezależnienie się od skal intensywności opracowanych dla innych charakterystyk drgań sejsmicznych, których źródłem są trzęsienia ziemi, eksplozje materiałów wybuchowych, ruch uliczny, praca ciężkich maszyn itp. Wiele elementów oceny zagrożenia sejsmicznego wymaga jednak dalszego doskonalenia, istnieje też potrzeba modyfikacji równań empirycznych, tzw. relacji tłumienia i tworzenia na ich podstawie map intensywności sejsmicznej.

Najważniejsze kierunki rozwoju badań w zakresie oddziaływania górniczych wstrząsów sejsmicznych na powierzchnię to:

- w zakresie monitorowania:
  - opracowanie tanich przenośnych urządzeń rejestrujących parametry drgań, wykorzystujących akcelerometry, czujniki GPS i sieci komórkowe do automatycznej transmisji parametrów drgań;
- w zakresie skal intensywności drgań:
  - opracowanie ujednoliconej górniczej skali intensywności sejsmicznej dla wszystkich obszarów górniczych w Polsce indukujących zjawiska sejsmiczne (LGOM, GZW, LZW i BZWB);
- w zakresie relacji tłumienia i map intensywności sejsmicznej:
  - opracowanie równań relacji tłumienia GMPE uwzględniających dodatkowe czynniki wpływające na intensywność drgań, szczególnie kierunkowość drgań związaną z mechanizmem źródła wstrząsu,
  - bardziej szczegółowe opracowanie map amplifikacji drgań przez nadkład, z wykorzystaniem prędkości propagacji fal poprzecznych i z wydzieleniem miąższości warstw z pomiarów sejsmicznych techniką MASW,
  - prowadzenie badań w celu zweryfikowania obliczeń współczynnika amplifikacji drgań techniką spektralną dzielenia widm HVSR, z pomiarów *in situ* szumu sejsmicznego i zastosowanie jej do wyznaczania map amplifikacji drgań,

- wprowadzenie do stosowania modelowania numerycznego 3D pola falowego, uwzględniającego lokalizację i energię sejsmiczną wstrząsu, budowę geologiczną obszaru, amplifikację drgań i mechanizm ogniska wstrząsu,
- obliczanie map intensywności drgań i intensywności sejsmicznej uwzględniających kompleksowe zastosowanie równań empirycznych GMPE, mapy amplifikacji drgań badanego obszaru oraz rzeczywistych parametrów drgań zarejestrowanych przez stacje sejsmometryczne podczas górniczego wstrząsu sejsmicznego.

Podjęcie wyżej wymienionych tematów badawczych w znacznym stopniu przyczyni się do lepszego prognozowania parametrów drgań sejsmicznych na terenach górniczych i ich wpływu na powierzchnię.

## Literatura

- 1. Achenbach A.D. (1975): Wave propagation in elastic solids. A volume in North-Holland Series in Applied Mathematics and Mechanics. Elsevier B.V.
- 2. Aki K., Richards P.G. (1980): Quantitative seismology theory and methods, Vol. 1, 2. San Francisco, W.H. Freeman and Co.
- 3. Alber M., Fritschen R. (2011): Rock mechanical analysis of a M = 4.0 seismic event induced by mining in the Saar District, Germany. Geophysics Journal International, Vol. 186, s. 359–372.
- 4. Arias A.S. (1970): A measure of earthquake intensity, [w] R.I. Hansen (Ed.), Seismic Design of Nuclear Power Plants (s. 438–483). MIT Press.
- 5. Atkinson G.M. (2015): Ground-motion prediction equation for small-to-moderate events at short hypocentral distances, with application to induced-seismicity hazards. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 105(2A), s. 981–992.
- 6. Bańka P. (2014): Acceleration field of ground vibrations and anisotropy of wave propagation. Journal of Mining, Materials and Metallurgical Engineering, Vol. 1, s. 1–10.
- Bańka P., Kołodziejczyk P., Lier E. (2016): Wykorzystanie wyników pomiarów parametrów drgań gruntu do wyznaczenia wartości współczynnika amplifikacji drgań. Przegląd Górniczy, T. 72, nr 4, s. 71–79.
- 8. Barański A., Mutke G. (2008): Problematyka wstrząsów górniczych i skala GSI-GZW<sub>KW</sub> w kopalniach Kompanii Węglowej SA, [w] Bezpieczeństwo i ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych. Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko, nr VI, s. 11–32.
- Barański A., Kloc L., Kowal T., Mutke G. (2014): Górnicza Skala Intensywności Drgań GSI<sub>GZWKW</sub>-2012 w odniesieniu do odporności dynamicznej budynków. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie, nr 6, s. 3–10 (wraz ze sprostowaniem Redakcji w numerze 11(243)/2014, s. 32–33).
- 10. Barbosa A.R., Ribciro F.L.A., Neves L.A.C. (2017): Influence of earthquake groundmotion duration on damage estimation: application to steel moment resisting frames. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 46, s. 27–49.
- Bard P.Y. (1998): Microtremor measurements: A tool for site effect estimation? Manuscript for Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Symposium on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion, Yokohama, Japan.
- 12. Bard P.-Y. (Ed.) (2008): The H/V technique: results of the SESAME project. Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 6, Issue 1, s. 1–147.
- 13. Bath M. (1973): Introduction to seismology. New York Toronto, John Wiley & Sons.
- 14. Ben-Menahem A., Singh S.J. (1981): Seismic waves and sources. New York, Springer Verlag.
- 15. Boatwiright J., Fletcher J.B. (1984): The partition of radiated energy between P and S waves. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 74, No 2, s. 361–376.
- 16. Bolt B.A., Abrahamson N.A. (1982): New attenuation relations for peak and expected accelerations of strong ground motion. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 72, No 6, s. 2307–2321.
- Bommer J.J., Dost B., Edwards B., Stafford P.J., van Elk J., Doornhof D., Ntinalexis M. (2016): Developing an application-specific ground-motion model for induced seismicity. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 106, No 1, s. 158–173.

- 18. Bońkowski P.A., Zembaty Z., Minch M. (2018): Time history response analysis of a slender tower under translational-rocking seismic excitations. Engineering Structures, Vol. 155, s. 387–393.
- 19. Boore D.M. (2004): Estimating vs30 (or NEHRP site classes) from shallow velocity models (depths 30 m). Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 94, No 2, s. 591–597.
- 20. Boore D.M. (2005): Erratum: Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from western north american earthquakes: A summary of recent work. Seismological Research Letters, Vol. 76, Issue 3, s. 368–369.
- 21. Boore D.M., Joyner W.B., Fumal T.E. (1993): Estimation of response spectra and peak accelerations from western north american earthquakes: An interim report. Open-File Report 93-509, U.S. Geological Survey.
- 22. Boore D.M., Joyner W.B., Fumal T.E. (1997): Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from western north american earthquakes: A summary of recent work. Seismological Research Letters, Vol. 68, No 1, s. 128–153.
- 23. Borcherdt R.D. (1970): Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 60, No 1, s. 29–61.
- 24. Bormann P., Baumbach M., Bock G., Grosser H., Choy G.L., Boatwright J. (2009): Seismic source and source parameters, [w] P. Bormann (Ed.), New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP) (s. 1–94). Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ.
- 25. Brillinger D.R., Preisler H.K. (1985): Further analysis of the Joyner-Boore attenuation data. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 75, No 2, s. 611–614.
- 26. Brune J.N. (1970): Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. Journal of Geophysical Research, Vol. 75, s. 4997–5009 (Correction 1971, Vol. 76, s. 5002).
- 27. Campbell K.W. (1981): Near-source attenuation of peak horizontal acceleration. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 71, No 6, s. 2039–2070.
- 28. Campbell K.W., Bozorgnia Y. (2014): NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5%-damped linear acceleration response spectra. Earthquake Spectra, Vol. 30, Issue 3, s. 1087–1115.
- 29. Castro R.R., Fabriol H., Bour M., Le Brun B. (2003): Attenuation and site effects in the region of Guadeloupe, Lesser Antilles. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 93, No 2, s. 612–626.
- 30. Chavez-Garcia F., Stephenson W., Rodriquez M. (1999): Lateral propagation effects observed at Parkway, New Zealand. A case history to compare 1D versus 2D site effects. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 89, No 3, s. 718–732.
- 31. Chmielewski T., Zembaty Z. (1998): Podstawy dynamiki budowli. Warszawa, Wydaw. Arkady.
- 32. Chodacki J. (2013): Prognozowanie i ocena intensywności drgań wywołanych wstrząsami górniczymi dla obszaru GZW w oparciu o skalę GSI (rozprawa doktorska). Katowice, Główny Instytut Górnictwa.
- Chodacki J. (2014): Regionalne relacje tłumienia przyspieszenia drgań w obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Wiadomości Górnicze, T. 65, nr 7–8, s. 387– 395.
- 34. 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, s. 2449–2470.
- 35. COMEX (2017): COMEX(RFCS-PR-11012): Complex Mining Exploitation: optimizing mine design and reducing the impact on human environment (realizowany w latach 2012–2015). Raport końcowy. Koordynator: Publication Office of the European Union.
- 36. Douglas J. (2018): Ground motion prediction equations 1964–2018. University of Strathclyde, p. 628. http://www.gmpe.org.uk; dostęp: 15.04.2019.
- 37. Douglas J., Edwards B., Convertito V., Sharma N., Tramelli A., Kraaijpoel D., Cabrera B.M., Maercklin N., Troise C. (2013): Predicting ground motion from induced earthquakes in geothermal areas. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 103, No 3, s. 1875–1897.
- Dubiński J. (1995): Metody obliczania energii sejsmicznej wstrząsów górniczych, [w] Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej, Seria Wykłady nr 8 (s. 115–142). Kraków, CPPGSMiE PAN.
- 39. Dubiński J., Wierzchowska Z. (1973): Metody obliczeń energii wstrząsów górotworu na Górnym Śląsku. Komunikat GIG nr 591. Katowice, Główny Instytut Górnictwa.
- 40. Dubiński J., Gerlach Z. (1983): Ocena oddziaływania górniczych wstrząsów górotworu na środowisko naturalne. Przegląd Górniczy, T. 39, nr 3, s. 135–142.
- 41. Dubiński J., Mutke G. (2006): Weryfikacja skali GSI-2004 oceny skutków drgań wywołanych wstrząsami górniczymi w obszarze LGOM, [w] Warsztaty Górnicze 2006 nt. Zagrożenia naturalne w górnictwie (s. 79–93). Kraków, IGSMiE PAN.
- 42. Dubiński J., Mutke G. (2001): Reakcja budynków na wstrząsy górnicze z wysokoczęstotliwościową modą drgań gruntu, [w] Warsztaty Górnicze 2001 nt. Zagrożenia naturalne w górnictwie (s. 543–550). Kraków, IGSMiE PAN.
- 43. Dubiński J., Mutke G. (2007): Górnicza Skala Intensywności GSI-GZW do oceny skutków oddziaływania wstrząsów górniczych w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym na obiekty budowlane i na ludzi, [w] Geologia i geofizyka w rozwiązywaniu problemów współczesnego górnictwa i terenów pogórniczych. Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko, nr III, s. 199–211.
- 44. Dubiński J., Mutke G. (2012): Ocena wpływu wstrząsów górniczych dla projektowanej eksploatacji w oparciu o skalę GSI<sub>GZW</sub>-2012, [w] A. Kowalski (red.), Ochrona obiektów na terenach górniczych (s. 46–52). Katowice, Główny Instytut Górnictwa.
- 45. Dubiński J., Lurka A., Stec K. (2006): Badanie zależności pomiędzy radiacją sejsmiczną a mechanizmem ognisk wstrząsów górotworu na podstawie rejestracji sejsmologicznych i sejsmometrycznych, [w] Warsztaty Górnicze 2006 nt. Zagrożenia naturalne w górnictwie (s. 65–77). Kraków, IGSMiE PAN.
- 46. Dubiński J., Mutke G., Lurka A., Stec K., Siata R. (2003a): Dokumentacja Zadanie nr 2.4 pt. Opracowanie i wybór optymalnych algorytmów do obliczania współczynnika amplifikacji drgań w LGOM. Projekt celowy nr 6 T12 0063 2002 C/05870 pt. System oceny oddziaływań sejsmicznych na powierzchnię wywołanych przez eksploatację złoża rud miedzi w zakładach górniczych LGOM, realizowany w latach 2002–2005 (niepublikowana).
- 47. Dubiński J., Mutke G., Lurka A., Stec K., Chodacki J., Guzik P. (2003b): Dokumentacja Zadanie badawcze nr 3.2. pt. Określenie interakcji drgań z gruntu na fundamenty budynków opracowanie funkcji przejścia drgań dla różnych typów budynków i charakterystyk wstrząsów w ramach realizacji projektu celowego pt. System oceny oddziaływań sejsmicznych na powierzchnię wywołanych przez eksploatację złoża rud miedzi w zakładach górniczych LGOM, nr projektu 6 T12 0063 2002 C/05870 (niepublikowana).

- 48. Dubiński J., Mutke G., Jaśkiewicz K., Lurka A. (2004a): Dokumentacja Opracowanie założeń nowych propozycji oceny skutków drgań na środowisko powierzchniowe Zadanie nr 6.1 projektu celowego System oceny oddziaływań sejsmicznych na powierzchnię wywołanych przez eksploatację złoża rud miedzi w zakładach górniczych LGOM (niepublikowana).
- 49. Dubiński J., Mutke G., Lurka A., Logiewa H., Stec K., Siata R., Chodacki J. (2004b): Dokumentacja – Korelacja spektrów odpowiedzi z obserwowanymi wpływami wstrząsów na budynki. Zadanie nr 5.1 w projekcie celowym KBN-KGHM-GIG pn. System oceny oddziaływań sejsmicznych na powierzchnię wywołanych przez eksploatację złoża rud miedzi w zakładach górniczych LGOM, nr projektu 6 T12 0063 2002 C/05870 (niepublikowana).
- 50. Dubiński J., Mutke G., Lurka A., Jaśkiewicz K., Stec K., Siata R., Chodacki J. (2006a): Raport końcowy z projektu celowego nr 6 T12 0063 2002 C/05870 pt. System oceny oddziaływań sejsmicznych na powierzchnię wywołanych przez eksploatację złoża rud miedzi w zakładach górniczych LGOM, realizowany w latach 2002–2005 (niepublikowany).
- 51. Dubiński J., Jaśkiewicz K., Lurka A., Mutke G. (2006b): Instrukcja prowadzenia powierzchniowych pomiarów sejsmometrycznych, interpretacji wyników oraz oceny i prognozowania drgań sejsmicznych wywołanych wstrząsami górniczymi na powierzchni w LGOM w oparciu o skalę GSI-2004 (niepublikowana).
- 52. Dubiński J., Mutke G., Stec K., Lurka A., Barański A. (2009a): Górnicza Skala Intensywności GSI-GZW do oceny skutków oddziaływania wstrząsów indukowanych eksploatacją złóż węgla kamiennego w zakładach górniczych Kompanii Węglowej SA na obiekty budowlane i na ludzi, [w] G. Mutke, T. Tatara (red.), Górnicze skale intensywności drgań GSI i doświadczenia z ich stosowania. Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko, nr 2/2, s. 73–90.
- 53. Dubiński J., Mutke G., Jaśkiewicz K., Lurka A. (2009b): Górnicza Skala Intensywności GSI-2004 do oceny skutków drgań wywołanych wstrząsami górniczymi w obszarze LGOM – geneza, skala i weryfikacja, [w] G. Mutke, T. Tatara (red.), Górnicze skale intensywności drgań GSI i doświadczenia z ich stosowania. Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko, nr 2/2, s. 25–72.
- 54. Dubiński J., Jaśkiewicz K., Lurka A., Mutke G. (2011): Górnicza Skala Intensywności Sejsmicznej GSI-2004/11 dla wstrząsów górniczych w LGOM. Wrocław, KGHM Cuprum CBR (niepublikowana).
- 55. Elnashai A.S., Di Sarno L. (2008): Fundamental of Earthquake Engineering. Willey.
- 56. Esteva L., Rosenblueth E. (1964): Espectros de temblores a distancias moderadas y grandes. Boletin Sociedad Mexicana de Ingenieria Sesmica, No 2, s. 1–18.
- 57. Gibowicz S. (1963): Klasyfikacja energetyczna wstrząsów podziemnych na Górnym Śląsku i częstotliwość ich występowania w zależności od energii. Archiwum Górnictwa, T. VIII, z. 1, 17–41.
- 58. Gibowicz S. (1989): Mechanizm ognisk wstrząsów górniczych. Publications of the Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, M13 (221).
- 59. Gibowicz J. (2002): Mechanizm wstrząsu z dnia 20.02.2002 r. (oprac. niepublikowane).
- 60. Gibowicz S., Kijko A. (1994): An introduction to mining seismology. New York, Academic Press.
- 61. Gibowcz S., Harjes H.-P., Schäfer M. (1990): Source parameters of seismic events at Heinrich Robert mine, Ruhr Basin, Federal Republic of Germany: Evidence for non-double couple events. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 80, No 1, s. 88–109.

- 62. Gil-Kleczeńska B., Kwiatek J., Muszyński L. (1985): Kryteria i klasyfikacja dynamicznej odporności budynków poddanych wstrząsom pochodzenia górniczego. Ochrona Terenów Górniczych, nr 71/1, s. 18–21.
- 63. Golik A., Mendecki M.J. (2012): Ground motion prediction equations for induced seismicity in the Main Anticline and Main Syncline, Upper Silesian Coal Basin, Poland. Acta Geophysica, Vol. 60, s. 410–425.
- 64. Gutenberg B., Richter C.F. (1956): Magnitude and energy of earthquakes. Annali di Geofisica, Vol. 9, No 1, s. 1–6.
- 65. Hanks T.C., Kanamori H. (1979): A moment magnitude scale. Journal of Geophysical Research, Vol. 84, Issue 5, s. 2348–2350.
- 66. Haskell N. (1960): Crustal reflections of plane SH waves. Journal of Geophysical Research, Vol. 65, Issue 12, s. 4147–4150.
- Holecko J., Mutke G. (2012): The mining seismicity influence on surface in Ostrava-Karvina coalfield – first results of monitoring with new seismic network, [w]
   P. Konicek, K. Soucek (Eds.), 4<sup>th</sup> Traditional International Colloquium on Geomechanics and Geophysics GEKO 2012 (s. 33–34). Academy of Sciences of the Czech Republic.
- 68. Holeczek G., Mutke G. (2016): Wyznaczenie relacji empirycznej magnitudy z momentu sejsmicznego z energią sejsmiczną dla wstrząsów górotworu na Górnym Śląsku. Praca statutowa GIG nr 11130755-120 (niepublikowana).
- 69. Idriss I.M., Seed H.B. (1968): Seismic response of horizontal soil layers. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 94, No SM4, July, s. 1003–1031.
- 70. Idziak A. (2010): Badanie rozkładów epicentrów silnych wstrząsów w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym, [w] W.M. Zuberek, K. Jochymczyk (red.), Geneza i charakterystyka zagrożenia sejsmicznego w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym (s. 53–59). Katowice, Wydaw. Uniwersytetu Śląskiego.
- 71. Idziak A.F., Teper L., Zuberek W.M. (1999): Sejsmiczność a tektonika Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Katowice, Wydaw. Uniwersytetu Śląskiego.
- 72. Igel H., Käser M., Stupazzini M. (2015): Simulation of seismic wave propagation in media with complex geometries (revised 2nd edition), [w] Encyclopedia of Complexity and Systems Science (s. 1–32). New York, Springer Science+Business Media.
- Igel H., Schreiber U., Flaws A., Schuberth B., Velikoseltsev A., Cochard A. (2005): Rotational motions induced by the M8. 1 Tokachioki earthquake, September 25, 2003. Geophysical Research Letters, Vol. 32, s. 1–5.
- 74. Jaśkiewicz K. i inni (2004): Dokumentacja Korelacja amplitud prędkości drgań, przyspieszenia drgań i przemieszczenia z obserwowanymi wpływami wstrząsów na budynki oraz korelacja częstotliwości drgań i czasu trwania z obserwowanymi wpływami wstrząsów na budynki. Zadanie nr 5.2 i 5.3 w projekcie celowym KBN-KGHM-GIG pn. System oceny oddziaływań sejsmicznych na powierzchnię wywołanych przez eksploatację złoża rud miedzi w zakładach górniczych LGOM, nr projektu 6 T12 0063 2002 C/05870 (niepublikowana).
- 75. Jaśkiewicz-Proć I. (2012): Porównanie prognozowanych i zarejestrowanych parametrów drgań od wstrząsów górniczych w bliskich odległościach epicentralnych na terenie LGOM, [w] Warsztaty Górnicze 2012 nt. Zagrożenia naturalne w górnictwie (s. 165–176). Kraków, IGSMiE PAN.

- 76. Jaśkiewicz-Proć I., Stolecki L., Jaśkiewicz K. (2016): Weryfikacja wzorów empirycznych określających poziom parametrów drgań gruntu wywołanych wstrząsami górniczymi z uwzględnieniem różnych przedziałów energii wstrząsów. Wrocław, KGHM Cuprum CBR (niepublikowana).
- 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 the Seismological Society of America, Vol. 71, No 6, s. 2011– 2038.
- Joyner W.B., Boore D.M. (1988): Measurement, characterization, and prediction of strong ground motion, [w] Earthquake Engineering and Soil Dynamics II – Recent Advances in Ground-Motion Evaluation: Proceedings of the Specialty Conference (s. 43–102). New York, ASCE.
- 79. Joyner W.B., Boore D.M. (1993): Methods for regression analysis of strong-motion data. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 83, No 2, s. 469–487.
- 80. Kaláb Z., Knejzlik J. (2012): Examples of rotational component records of mining induced seismic events from Karviná region. Acta Geodynamica et Geomaterialia, Vol. 9, No 2, s. 173–178.
- 81. Kanamori H., Mori J., Hauksson E., Heaton T.H., Hutton L.K., Jones L.M. (1993): Determination of earthquake energy release and ML using TERRAscope. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 83, No 2, s. 330–346.
- 82. Kijko A., Drzęźla B., Stankiewicz T. (1987): Bimodal character of extremal seismic events in Polish mines. Acta Geophysica Polonica, Vol. 35, s. 1157–1168.
- 83. Kokusho T. (2017): Innovative earthquake soil dynamics. CRC Press/Balkema.
- 84. Konno K., Ohmachi T. (1998): Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 88, No 2, s. 228–241.
- 85. Kotyrba A., Mutke G. (2015): Impact of deep mining on shallow voids stability and sinkhole hazard. AIMS 2015, [w] Fifth International Symposium Mineral Resources and Mine Development (Vol. 14, s. 561–567). RWTH Aachen University.
- 86. Kwiatek J. (2007): Obiekty budowlane na terenach górniczych. Katowice, Główny Instytut Górnictwa.
- 87. Kwiatek J. (kierownik zespołu), Dubiński J., Frolik A., Gil-Kleczeńska B., Jędrzejec E., Kowalski A., Muszyński L., Mutke G., Zawora J. (2000): Zasady oceny możliwości prowadzenia podziemnej eksploatacji górniczej z uwagi na ochronę obiektów budowlanych. Instrukcja nr 12 w Głównego Instytutu Górnictwa, Katowice.
- Lachet C., Bard P.Y. (1994): Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique. Journal of Physics and Earth, Vol. 42, s. 377–387.
- 89. Lasocki S. (2013): Site specific prediction equations for peak acceleration of ground motion due to earthquakes induced by underground mining in Legnica-Głogów Copper District in Poland. Acta Geophysica, Vol. 61, No 5, s. 1130–1155.
- Lasocki S., Szybiński M., Matuszyk J., Mirek J., Pielesz A. (2000): Prognozowanie drgań powierzchni wywołanych wstrząsami górniczymi – przegląd krytyczny, [w] Warsztaty Górnicze 2000 nt. Zagrożenia naturalne w górnictwie (s. 261–279). Kraków, IGSMiE PAN.
- 91. Lasocki S., Orlecka-Sikora B., Leptokaropoulos K., Lizurek G., Sterzel M., Szepieniec T., Mutke G. i zespół IS-EPOS (2016): Platforma IS-EPOS jako nowoczesne narzędzie w badaniach sejsmiczności antropogenicznej. Zeszyty Naukowe IGSMiE PAN, R. 93, s. 49–62.

- 92. Lasocki S., Orlecka-Sikora B., Leptokaropoulos K., Sterzel M., Szepieniec T., Kocot J., Mutke G., Barański A. and the IS-EPOS team IS-EPOS (2017): A digital research space to facilitate integrated approach to anthropogenic seismic hazards. Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake, 16WCEE 2017, Santiago, Chile, 9–13.01.2017.
- 93. Lee W.H., Igel H., Trifunac M.D. (2009): Recent advances in rotational seismology. Seismological Research Letters, Vol. 80, No 3, s. 479–490.
- 94. Lee W.H., Huang B.S., Langston C.A., Lin C.J., Liu C.C., Shin T.C., Teng T.C., Wu C.F. (2009): Review: Progress in rotational ground-motion observations from explosions and local earthquakes in Taiwan. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 99(2B), s. 958–967.
- 95. Lomnitz C., Rosenblueth E. (1976): Seismic and engineering decisions. Elsevier.
- 96. Lurka A., Stec K. (2005): Charakterystyka radiacji fal sejsmicznych w obszarze epicentralnym dla wstrząsów w LGOM, [w] Warsztaty Górnicze 2005 nt. Zagrożenia naturalne w górnictwie (s. 391–404). Kraków, IGSMiE PAN.
- 97. Lurka A., Logiewa H. (2007): Sejsmologiczny System Obserwacji SOS jako nowe narzędzie do obserwacji i interpretacji danych sejsmicznych w górnictwie zagrożonym tąpaniami, [w] Geologia i geofizyka w rozwiązywaniu problemów współczesnego górnictwa i terenów górniczych. Prace Naukowe GIG. Katowice. Górnictwo i Środowisko, nr III, s. 283–296.
- 98. Lurka A., Mutke G., Dubiński J. (2003): Dokumentacja Propagacja fal w górotworze LGOM wraz z jego weryfikacją – zadanie 1.1 w projekcie celowym nr 6 T12 0063 2002 C/05870 pt. System oceny oddziaływań sejsmicznych na powierzchnię wywołanych przez eksploatację złoża rud miedzi w zakładach górniczych LGOM (niepublikowana).
- 99. Lurka A., Gierlotka M., Siata R. (2019): Wyznaczanie względnych współczynników amplifikacji dla wartości szczytowych przyspieszenia i prędkości drgań gruntu w oparciu o relację tłumienia w rejonie uskoku kłodnickiego. Przegląd Górniczy, T. 75, nr 3, s. 1–8.
- 100. Mallat S., Zhang Z. (1993): Matching Pursuit with time frequency dictionaries. IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 41, Issue 12, s. 3397–3415.
- 101. Marcak H., Zuberek W. (1994): Geofizyka górnicza. Katowice, Śląskie Wydaw. Techniczne.
- 102. Marcak H., Mutke G. (2013): Seismic activation of tectonic stresses by mining. Journal of Seismology, Vol. 17, Issue 4, s. 1139–1148.
- 103. Mendecki A.J. (2013): Mine seismology glossary of selected terms. Conference: The 8th Rockburst and Seismicity in Mines Symposium, Russia, 2013, At St Petersburg-Moscow, Russia, Volume: St Petersburg.
- 104. Mendecki M., Duda J., Idziak A. (2018): Ground-motion prediction equation and site effect characterization for the central area of the Main Syncline, Upper Silesia Coal Basin, Poland. Open Geosciences, Vol. 10, Issue 1, s. 474–483.
- 105. Minch M.Y., Samokar Z. (2007): Analiza skutków dużego wstrząsu górniczego na zabudowę powierzchniową miasta Polkowice, [w] Materiały XXIII Konferencji Naukowo-Technicznej pn. Awarie budowlane (s. 299–306). Szczecin, Politechnika Szczecińska.
- 106. Musson R.M.W., Cecić I. (2011): Intensity and intensity scales, [w] P. Bormann (Ed.), New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP) (s. 1–41). Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ.

- 107. Muszyński L. (1993): Klasyfikacja dynamicznej odporności budynków. Przegląd Górniczy, T. 49, nr 1, s. 11–13.
- 108. Muszyński L. (kierownik zespołu), Kowalski A., Mika W., Gruchlik P., Lazar P., Nicer P., Paszek K., Pilszak B. (2015): Ekspertyza dotycząca kontynuacji eksploatacji górniczej w pokładzie 207 w aspekcie ochrony powierzchni, w świetle wstrząsów górniczych. Ekspertyza Głównego Instytutu Górnictwa dla Tauron Wydobycie (niepublikowana).
- 109. Mutke G. (1991): Metoda prognozowania parametrów drgań podłoża generowanych wstrząsami górniczymi w obszarze GZW (rozprawa doktorska). Katowice, Główny Instytut Górnictwa.
- 110. Mutke G. (2008): Stability of the underground mine workings in the near-field zone of seismic events, [w] 21<sup>st</sup> World Mining Congress 2008 New Challenges and Vision for Mining. Underground Mine Environment (s. 89–97). Cracow, University of Science & Technology (AGH).
- 111. Mutke G. (2011): Ocena stopnia potencjalnego zagrożenia stateczności wyrobisk przyścianowych poddanych oddziaływaniu wstrząsów górotworu, [w] Górnicze Zagrożenia Naturalne. Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko, nr 4/2, s. 327–335.
- 112. Mutke G. i inni (1993): Opracowanie charakterystyk sygnałów sejsmicznych indukowanych wstrząsami górniczymi w aspekcie ich oddziaływania na środowisko naturalne na powierzchni. Grant KBN nr 900849101. Katowice, Główny Instytut Górnictwa (niepublikowane).
- 113. Mutke G., Dworak J. (1992): Czynniki warunkujące efekt sejsmiczny wstrząsów górniczych na powierzchniowe obiekty budowlane w obszarze GZW. Wybrane zagadnienia geofizycznych badań w kopalniach – Lubiatów 1991. Publications of the Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, M-16(245), s. 115–130.
- 114. Mutke G., Stec K. (1997): Seismicity in the Upper Silesian coal basin, Poland: Strong regional seismic events, [w] S.J. Gibowicz, S. Lasocki (Eds.), Proceedings 4th International Symposium Rockburst and Seismicity in Mines (s. 213–218). Rotterdam, Balkema.
- 115. Mutke G., Stec K. (2008): Prognozowanie drgań powierzchni i ich pomiarowa weryfikacja, [w] Bezpieczeństwo i ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych. Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko, nr VI, s. 331–350.
- 116. Mutke G., Chodacki J. (2010): Charakterystyka parametrów drgań od najsilniejszych wstrząsów regionalnych w GZW w aspekcie kryteriów oceny intensywności w oparciu o skalę GSI<sub>GZW</sub>, [w] G. Mutke, T. Tatara (red.), Wstrząsy górnicze – charakterystyka parametrów drgań oraz kryteria oceny wpływu na obiekty budowlane. Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko, nr 4/4, s. 65–80.
- 117. Mutke G., Dubiński J. (2016). Seismic intensity induced by mining in relations to weak earthquakes, [w] Proceedings of the 24th World Mining Congress. Part. Underground Mining, Rio de Janeiro (s. 399–407).
- 118. Mutke G., Zembaty Z., Nawrocki D. (2017): Scaling rotational and translational ground motion parameters from induced seismic events. 2017 Annual Meeting Seismological Society of America. 18–20.04.2017, Denver-Colorado, USA.
- 119. Mutke G., Muszyński L., Tatara T., Stec K., Lurka A., Chodacki J., Siata R., Holeczek G. (2012): Weryfikacja Górniczej Skali Intensywności Drgań GSI-GZW<sub>KW</sub>, stosowanej w kopalniach Kompanii Węglowej S.A. od sierpnia 2008 roku, w aspekcie oceny skutków oddziaływania wstrząsów górniczych na obiekty budowlane i na ludzi. Dokumentacja wykonana na podstawie umowy nr 58127682-120 zawartej między Kompanią Węglową S.A. i Głównym Instytutem Górnictwa (niepublikowana).

- 120. Mutke G., Chodacki J., Muszyński L., Kremers S., Fritschen R. (2015a): Mining Seismic Instrumental Intensity Scale MSIIS-15 – verification in coal basins, [w] Fifth International Symposium Mineral Resources and Mine Development (Vol. 14, s. 551–560). RWTH Aachen University.
- 121. Mutke G., Dubiński J., Muszyński L., Stec K., Lurka A., Chodacki J., Kremers S., Peters S., Fritschen R., Barański A., Kowal T. (2015b): Deliverable 1.4.: New European Mining Seismic Intensity Scale MSIIS-15, [w] Complex Mining Exploitation: optimizing mine design and reducing the impact on human environment (2012–2015). COMEX Project (RFCS-PR-11012). www.grss.gig.eu/en/.
- 122. Mutke G., Lurka A., Nawrocki D., Holeczek G. (2016): Monitorowanie i badanie efektów rotacyjnych zjawisk sejsmicznych indukowanych przez eksploatację górniczą w GZW. Praca statutowa nr 11207146-120. Katowice, Główny Instytut Górnictwa (niepublikowana).
- 123. Mutke G., Barański A., Chodacki J., Dubiński J., Kowal T., Lurka A., Muszyński L., Stec K. (2017a): Górnicza Skala Intensywności Sejsmicznej GSIS-2017 dla oceny skutków drgań wywołanych w środowisku powierzchniowym zjawiskami sejsmicznymi indukowanymi eksploatacją węgla kamiennego. Praca statutowa nr 11207156-120 realizowana w latach 2016–2017. Katowice, Główny Instytut Górnictwa (niepublikowana).
- 124. Mutke G., Marcak H., Mutke F., Barański A. (2017b): Metoda wyznaczania mapy rozkładu intensywności sejsmicznej IGSI po wystąpieniu silnego wstrząsu pochodzenia górniczego. Przegląd Górniczy, T. 73, nr 2, s. 51–58.
- 125. Mutke G. (red.), Barański A., Chodacki J., Dubiński J., Kowal T., Lurka A., Muszyński L., Stec K. (2018): Zasady stosowania Górniczej Skali Intensywności Sejsmicznej GSIS-2017 do prognozy oceny skutków oddziaływania wstrząsów indukowanych eksploatacją na obiekty budowlane oraz klasyfikacji ich odporności dynamicznej. Instrukcja nr 23 Głównego Instytutu Górnictwa, Katowice.
- 126. Mutke G., Kotyrba A., Lurka A., Olszewska D., Borkowski A., Araszkiewicz A., Barański A. (2019a): Upper Silesian Geophysical Observation System – a unit of the EPOS project. Journal of Sustainable Mining, Vol. 18, Issue 4, s. 198–207.
- 127. Mutke G., Stec K., Lurka A., Chodacki J., Siata R., Holeczek G., Kurzeja J. (2019b): Złoże Bełchatów. Aktualizacja prognozy występowania wstrząsów sejsmicznych w rejonie Kopalni Bełchatów – dostosowanie Górniczej Skali Intensywności Sejsmicznej (GSIS-2017) do zjawisk sejsmicznych rejestrowanych przez kopalnianą sieć sejsmologiczną. Ekspertyza wykonana na zlecenie PGE Górnictwo i Energetyka Konwencjonalna SA z siedzibą w Bełchatowie, KWB Bełchatów (niepublikowana).
- 128. Nakamura Y. (1989): A method for dynamic characteristics estimations of subsurface using microtremors on the ground surface. Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports, Vol. 30, No 1, s. 25–33.
- 129. Nakamura Y. (2000): Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications, [w] 12 WCEE 2000: 12th World Conference on Earthquake Engineering (s. 1–9). Auckland, New Zealand Society for Earthquake Engineering.
- 130. Newmark N., Rosenblueth E. (1964): Fundamentals of earthquakes engineering. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall.
- 131. Niewiadomski J. (1997): Seismic source radiation and moment tensor in the time domain, [w] A.J. Mendecki (Ed.), Seismic Monitoring in Mines (s. 119–137). London, Chapman & Hall.

- 132. Nigam B.N., Jennings P.C. (1969): Calculation of response spectra from strongmotion earthquake records. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 59, No 2, s. 909–922.
- 133. Nigbor R.L. (1994): Six-degree-of-freedom ground-motion measurement. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 84, No 5, s. 1665–1669.
- 134. Okamoto S. (1984): Introductions to earthquake engineering. University of Tokyo Press.
- 135. Olsen K.B., Archuleta R.J. (1996): Three-dimensional simulation of earthquakes on the Los Angeles fault system. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 86, No 3, s. 575–596.
- 136. Olszewska D. (2006): Attenuation relations of ground motion acceleration response spectra for the Polkowice Region. Publications of the Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, M-29(395), s. 161–174.
- 137. Olszewska D. (2008): Ocena efektów lokalnych i struktury częstotliwościowej sygnałów sejsmometrycznych dla poprawy dokładności prognozy rozprzestrzeniania drgań wzbudzanych wstrząsami górniczymi w Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym (rozprawa doktorska). Kraków, Akademia Górniczo-Hutnicza – Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska – Katedra Geofizyki.
- 138. Olszewska D., Lasocki S. (2004): Application of the horizontal to vertical spectral ratio technique for estimating the site characteristics of ground motion caused by mining induced seismic events. Acta Geophysica Polonica, Vol. 52, No 3, s. 301–318.
- 139. Olszewska D., Mutke G. (2018): A study of site effect using surface-downhole seismic data in a mining area. 16th European Conference on Earthquake Engineering. Thessaloniki, June 2018.
- 140. Pachla F., Kowalska-Koczwara A., Tatara T., Stypula K. (2018): The influence of vibration duration on the structure of irregular RC buildings. Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 17, Issue 6, s. 3119–3138.
- 141. Park C.B., Xia J., Miller R.D. (1999): Using MASW to Map Bedrock in Olathe Kansas. Open-file Report No 99–9.
- 142. PN-85/B-02170-2016-12 Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki.
- 143. PN-EN 1998-1:2004. Eurokod 8: Projektowanie konstrukcji poddanych oddziaływaniom sejsmicznym – Część 1: Reguły ogólne, oddziaływania sejsmiczne i reguły dla budynków.
- 144. Pohl F., Sroka A. (2006): Neuer Klassifizierungsansatz fur Gebaude Gegenuber bergbaubed-ingten Erderschutterungen – Entwicklung und Erfahrungsbericht, [w]
  7. Geokinematischer Tag (s. 222–246). Freiberg, Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie.
- 145. Projekt EPOS-PL (2015–2021): European Plate Observing System (Europejski System Obserwacji Ziemi) No POIR.04.02.00-14-A003/16-00) realizowany w ramach funduszy Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój oraz funduszy European Regional Development Fund (ERDF). Koordynator: Instytut Geofizyki PAN. Kierow-nik projektu: dr inż. Dorota Olszewska.
- 146. Projekt IS EPOS (2007–2013): Cyfrowa przestrzeń badawcza sejsmiczności indukowanej dla celów EPOS. Program Operacyjny Innowacyjna Gospodarka. Koordynator: Instytut Geofizyki PAN. Kierownik projektu: prof. Stanisław Lasocki.
- 147. Pyra J. (2017): Wpływ wielkości opóźnień milisekundowych na spektrum odpowiedzi drgań wzbudzanych detonacją ładunków materiałów wybuchowych. Kraków, Akademia Górniczo-Hutnicza.

- 148. Richter C.F. (1935). An instrumental earthquake magnitude scale. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 25, No 1–2, s. 1–32.
- 149. Rudziński Ł., Dineva S. (2017): Towards energy magnitude for mining induced seismicity. 9th International Symposium on Rockburts and Seismicity in Mines, Nov 15–17, 2017, Santiago, Chile.
- 150. Rudziński L.C., Cesca G., Lizurek G. (2016): Complex rupture process of the 19 March 2013, Rudna Mine (Poland) induced seismic event and collapse in the light of local and regional moment tensor inversion. Seismological Research Letters, Vol. 87, s. 274–284.
- 151. Sawarienskij E.F. (1959): Ocena wpływu warstwy nadkładu na amplitudy drgań na powierzchni. Izviestia Akad. Nauk SSSR, s. Geofizyka 10, s. 1441–1447 (po rosyjsku).
- 152. Shearer P.M. (2009): Introduction to seismology. Cambridge University Press.
- 153. Schlindwein V., Koch K. (2003): A quantitative study of the site effects observed at the GERESS array. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 93, No 3, s. 1051–1064.
- 154. Schnabel B., Lysmer J., Seed B. (1972): A computer program distributed by NISEE/computer applications. Report No. EERC 72-12. Berkeley, California, College of Engineering University of California.
- 155. Sharma N., Convertito V., Maercklin N., Zollo A. (2013): Ground-motion prediction equations for the Geysers geothermal area based on induced seismicity records. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 103, No 1, s. 117–130.
- 156. Si H., Midorikawa S. (2000): New attenuation relations for peak ground acceleration and velocity considering effects of faulty type and site condition. 12th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE).
- 157. Siata R., Chodacki J. (2005): Zastosowanie metody MASW do wyznaczania profilu prędkościowego warstw przypowierzchniowych, [w] Warsztaty Górnicze 2005 nt. Zagrożenia naturalne w górnictwie (s. 493–499). Kraków, IGSMiE PAN.
- 158. Sokoła-Szewioła V. (2011): Badanie i modelowanie czasowych zmian przemieszczeń pionowych terenu górniczego w okresie wystąpienie wstrząsu indukowanego eksploatacją ścianową. Monografia 326. Gliwice, Wydaw. Politechniki Śląskiej.
- 159. Speczik S., Bachowski C., Dubiński J., Mutke G., Jaśkiewicz K. (2003): Korelacja rejestrowanych przyspieszeń drgań z obserwowaną intensywnością dla wstrząsów z obszaru LGOM. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie, nr 5, s. 7–8.
- 160. Sroka A. (2006): Klasyfikacja odporności budynków na wstrząsy górnicze z uwzględnieniem historii wstrząsów, [w] Konferencja ZSMGiG XXIX Geotechnika i Budownictwo Specjalne (s. 697–709). Kraków, Akademia Górniczo-Hutnicza.
- 161. Stec K. (2007): Characteristics of seismic activity of the Upper Silesian Coal Basin in Poland. Geophysical Journal International, Vol. 168, Issue 2, s. 757–768.
- 162. Stec K. i inni (2001): Dokumentacja Projekt badawczy nr 5 T12A05724 pt. Analiza wpływu parametrów fizycznych ognisk wstrząsów górniczych na rozkład oddziaływań sejsmicznych na powierzchni. Kierownik projektu K. Stec. Projekt finansowany przez Ministerstwo Nauki i Informatyzacji.
- 163. Stec K., Mutke G. (2010): Prognoza parametrów drgań powierzchni do oceny intensywności oddziaływania wstrząsów górniczych z wykorzystaniem skali GSI-GZW, [w] Bezpieczeństwo i ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych. Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko, nr 4/1, s. 322–337.

- 164. Stolecki L., Grzebyk W., Jaśkiewicz K., Jaśkiewicz-Proć I., Minch M. (2018): Weryfikacja skali GSI-2004/11. Dokumentacja wykonana przez KGHM CUPRUM CBR we Wrocławiu (niepublikowana).
- 165. Tatara T. (2012): Odporność dynamiczna obiektów budowlanych w warunkach wstrząsów górniczych. Kraków, Wydaw. Politechniki Krakowskiej.
- 166. Teisseyre R. (red.) (1983): Fizyka i ewolucja wnętrza Ziemi (T. 1–2). Kraków, PWN.
- 167. Teisseyre R., Takeo M., Majewski E. (2008): Earthquake source asymmetry, structural media and rotation effects. Berlin & Heidelberg, Springer-Verlag.
- 168. Teves-Costa P., Matias L., Bard P-Y. (1996): Seismic behaviour estimation of thin alluvium layers using microtremors recordings. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, No 15, s. 201–209.
- 169. Theodulidis N., Bard P-Y., Archuleta R., Bouchon M. (1996): Horizontal-to-vertical spectral ratio and geological conditions: the case of Garner Valley Downhole Array in the Southern California. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 86, No 2, s. 306–319.
- 170. Triantafyllidis P., Hatzidimitriou P.M., Theodulidis N., Suhadole P., Papazachos C., Raptakis D., Lontzetidis K. (1999): Site effects in city of Thessaloniki (Greece) estimated from acceleration data and 1-D local soil profiles. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 89, No 2, s. 521–537.
- 171. Trifunac M.D., Brady A.G. (1975): A study on the duration of strong earthquake ground motion. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 65, No 3, s. 581–626.
- 172. Udias A., Madariaga R., Buforn E. (2014): Source mechanisms of earthquakes theory and practice. Cambridge University Press.
- 173. Wald D.J., Quitoriano V., Heaton T.H., Kanamori H. (1999a): Relationship between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity for Earthquakes in California. Earthquake Spectra, Vol. 15, No 3, s. 557–564.
- 174. Wald D.J., Quitoriano V., Heaton T.H., Kanamori H., Scrivner C.W., Worden C.B. (1999b): TriNet "ShakeMaps": rapid generation of peak ground motion and intensity maps for earthquakes in southern California. Earthquake Spectra, Vol. 15, No 3, s. 537–556.
- 175. Wald D.J., Worden B.C., Quitoriano V., Pankow K.L. (2005): Shake map manual. Version 1.06/19/06. Technical manual, users guide, and software guide. https://pubs.usgs.gov/tm/2005/12A01/pdf/508TM12-A1.pdf; dostęp: 15.04.2019.
- 176. Zembaty Z. (2002): Wstrząs górniczy z 20 lutego 2002 w Polkowicach. Ocena intensywności zjawiska na powierzchni gruntu. Ekspertyza dla ZG Rudna. Opole, Politechnika Opolska (niepublikowana).
- 177. Zembaty Z. (2004): Rockburst induced ground motion a comparative study. International Journal of Soil Dynamics & Earthquake Engineering, Vol. 24, No 1, s. 11–23.
- 178. Zembaty Z., Kokot S., Bozzoni F., Scandella L., Lai C.G., Kuś J., Bobra P. (2015): A system to mitigate deep mine tremor effects in the design of civil infrastructure. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 74, s. 81–90.
- 179. Zembaty Z., Mutke G., Nawrocki D., Bobra P. (2017a): Rotational ground motion records from induced seismic events. Seismological Research Letters, Vol. 88, No 1/2, s. 13–22.
- 180. Zembaty Z., Mutke G., Bobra P., Nawrocki D. (2017b): Acquiring rotational ground motion from triggered seismic events. 16th World Conference on Earthquake Engineering, 16WCEE 2017 Santiago Chile, January 9th to 13th 2017.

dr hab. inż. Grzegorz Mutke, profesor w Głównym Instytucie Górnictwa w Katowicach, absolwent Wydziału Geologiczno-Poszukiwawczego Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, Kierownik Zakładu Geologii i Geofizyki Głównego Instytutu Górnictwa, ceniony w Polsce i na świecie za badania w zakresie sejsmologii górniczej. Autor lub współautor ośmiu monografii i ponad stu artykułów poświęconych ocenie zagrożenia sejsmicznego podziemnych wyrobisk górniczych i powierzchni, opublikowanych między innymi w takich czasopismach, jak Journal of Seismology, Acta Geodynamica et Geomaterialia, Seismological Research Letters, czy International Journal of Rock Mechanics. Współtwórca Górniczej Skali Intensywności Sejsmicznej stosowanej obecnie do oceny skutków oddziaływania wstrząsów indukowanych eksploatacją złóż surowców mineralnych na obiekty budowlane. Członek Rady Naukowej Głównego Instytutu Górnictwa, Komisji ds. Ochrony Powierzchni i Komisji ds. Zagrożeń w Zakładach Górniczych przy Wyższym Urzędzie Górniczym. Członek Komitetu Geofizyki Polskiej Akademii Nauki i Seismological Society of America.

## Z recenzji wydawniczych:

Na szczególną uwagę zasługuje przede wszystkim bogaty i oryginalny materiał empiryczny uzyskany podczas wieloletnich badań sejsmometrycznych prowadzonych pod kierunkiem Autora monografii. Uważam, że przedmiotowa monografia będzie stanowić unikalną pozycję w obszarze światowej literatury poświęconej sejsmiczności indukowanej przez działalność górniczą kopalń, szczególnie w zakresie jej oddziaływania na szeroko rozumianą powierzchnię, a więc na obiekty budowlane, infrastrukturę techniczną, ludzi i elementy środowiska naturalnego. Prof. dr hab. inż. Józef Dubiński, czł. koresp. PAN, Główny Instytut Górnictwa w Katowicach

Stwierdzam, że opracowanie (...) stanowi wartościową monografię o dużym znaczeniu naukowym i utylitarnym. Wypełnia ona lukę związaną z brakiem kompleksowej monografii w zakresie sejsmometrii górniczej i oceny oddziaływania na powierzchnię wstrząsów sejsmicznych indukowanych przez działalność górniczą kopalń w polskich zagłębiach górniczych. Przedmiotowa monografia zawiera szereg oryginalnych elementów autorskich, które stanowią istotny wkład Autora do rozwoju sejsmologii górniczej. Prof. dr hab. inż. Wacław Dziurzyński, Instytut Mechaniki Górotworu Polskiej Akademii Nauk w Krakowie