



Zastosowanie modeli numerycznych do oceny wielkości drgań górotworu w otoczeniu podziemnych wyrobisk górniczych

Numerical modeling for assessing the magnitude of rock mass vibration in the vicinity of underground mining excavations

Dr inż. Jacek Chodacki^{*)}

Treść: Wstrząsy sejsmiczne, wywołane nagłym odprężeniem skał górotworu w pobliżu podziemnych wyrobisk górniczych, stanowią zagrożenie dla ludzi pracujących pod ziemią. Propagująca fala sejsmiczna powoduje gwałtowny wzrost obciążeń dynamicznych, a te są bezpośrednio związane z wielkością drgań ośrodka skalnego. Znajomość parametrów tych drgań wpływa na ocenę stateczności wyrobisk podziemnych oraz pozwala na właściwy dobór obudowy chodnikowej. Jedną z metod umożliwiających prognozowanie parametrów drgań sejsmicznych od wstrząsów górniczych jest Metoda Elementów Spektralnych (SEM). W metodzie tej obliczane są sejsmogramy syntetyczne, które umożliwiają obrazowanie pełnego przebiegu falowego. W artykule przedstawiono wyniki modeli drgań od wstrząsu o magnitudzie 2.7 w skali Richtera, który wystąpił w dniu 17.04.2018 w kopalni KWK Piast-Ziemowit. Obliczone sejsmogramy wykazują dużą zgodność z rzeczywistymi przebiegami falowymi, zarejestrowanymi w bliskiej odległości od ogniska wstrząsu. Wskazuje to na właściwy dobór parametrów modelu i potwierdza skuteczność metod numerycznych, które mogą stanowić uzupełnienie metod analitycznych w rozwiązywaniu problemów związanych z bezpieczeństwem pracy pod ziemią.

Abstract: Seismic tremors, caused by sudden relaxation of a rock mass near underground mining excavations, pose a considerable threat to people working underground. The propagating seismic wave causes a rapid increase in the dynamic loads, which are directly related to the amount of rock vibration. Knowledge of the vibration parameters can be used in the assessment of the stability of underground excavations and allows for the proper selection of gallery support. One of the methods for forecasting seismic vibration parameters from mining tremors is the spectral element method (SEM). In this method, synthetic seismograms are calculated to image the full waveform. This article presents the results of modeling vibrations generated by a tremor with a magnitude of 2.7 on the Richter scale; this tremor occurred on April 17, 2018, in the KWK Piast-Ziemowit mine. The calculated seismograms show high compliance with the real waveforms recorded near the source of the tremor. This compliance indicates that the selected model parameters were correct and confirms the effectiveness of numerical methods to complement analytical methods in solving problems related to underground work safety.

Słowa kluczowe:

sejsmologia górnicza, metoda elementów spektralnych, drgania górotworu, Górnośląskie Zagłębie Węglowe

Key words:

mining seismicity, spectral element method, peak particle velocity, Upper Silesian Coal Basin

1. Wprowadzenie

Wstrząsy indukowane działalnością górnictwem prowadzą do powstawania deformacji i uszkodzeń na powierzchni, ale przede wszystkim stanowią ogromne zagrożenie dla górników pracujących pod ziemią. Każdego roku w polskich kopalniach węgla kamiennego dochodzi do wypadków spowodowanych nagłym odprężeniem skał górotworu w pobliżu podziemnych wyrobisk górniczych. Odprężenia te są wynikiem naruszenia równowagi naprężeniowej w górotworze i kumulacji tych naprężeń, a następnie gwałtownego uwolnienia energii sprężystej, nagromadzonej w skałach w postaci fali sejsmicznej. Fale sejsmiczne propagują w ośrodku skalnym wywołując drgania, które w momencie dotarcia do wyrobiska górniczego powodują, że do istniejących naprężeń statycznych dodawane są chwilowe naprężenia dynamiczne. Jeżeli suma tych naprężeń przekroczy wytrzymałość obudowy górniczej, może dojść do zniszczenia wyrobiska i zawału skał. Wynika stąd, że znajomość obciążeń dynamicznych, a więc pośrednio wielkość drgań, jakimi poddawane są wyrobiska górnicze,

ma decydujące znaczenie w zagadnieniach związanych z bezpieczeństwem pracy pod ziemią.

Z wysokim stopniem zagrożenia sejsmicznego mamy do czynienia w przypadku, gdy ognisko wstrząsów znajduje się w niewielkiej odległości od wyrobisk górniczych. Mówimy wówczas o oddziaływaniu fal sejsmicznych w tak zwanym bliskim polu falowym. Drgania w polu bliskim mają postać krótkiego impulsu i charakteryzują się bardzo wysokimi amplitudami, w odróżnieniu od drgań w polu dalekim, gdzie fala jest silnie tłumiona, a drgania mają postać bardziej złożoną (Dubiński, Mutke 1996).

Jedną z metod prognozowania prędkości drgań w bliskim polu falowym jest metoda wykorzystująca zależność empiryczną pomiędzy parametrem wartości szczytowej prędkości drgań cząstek górotworu (Peak Particle Velocities) (PPV), odległością od ogniska wstrząsu do stanowiska i skalarnym momentem sejsmicznym (Mutke i in 2016). Zależność ta została opracowana na podstawie pomiarów wartości PPV na kilku poligonach badawczych w kopalniach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW). Ponadto opracowana została tzw. metoda PPV, która na podstawie bezpośredniego pomiaru wartości szczytowych prędkości drgań w wyrobiskach

^{*)} Główny Instytut Górnictwa, Katowice

eksploatacyjnych, umożliwia ocenę zagrożenia stateczności wyrobisk, zgodnie z przyjętymi kryteriami. W metodzie tej pomiar drgań odbywa się przy użyciu specjalistycznych sond pomiarowych typu DLMPPV, umożliwiających określenie parametru prędkości drgań w zakresie do 1 m/s. Tak szeroki zakres pomiarowy jest konieczny właśnie ze względu na wysokie amplitudy drgań rejestrowanych w bliskim polu falowym.

Niewątpliwie wśród metod pozwalających na szacowanie wielkości drgań w ośrodku skalnym, obok metod analitycznych (Mc Garr i in. 1981), są metody numeryczne, w tym, stosowana od niedawna w polskim górnictwie Metoda Elementów Spektralnych (SEM) (Chodacki 2019). Jest to metoda pierwotnie opracowana do obliczeń dynamiki płynów, ale z powodzeniem jest stosowana również do rozwiązywania problemów związanych z propagacją fal sejsmicznych w ośrodkach skalnych. Metoda SEM jest rozwinięciem klasycznej metody elementów skończonych. Umożliwia obliczanie pełnych przebiegów falowych wykorzystując wielowęzłowe elementy skończone. Jednak w metodzie tej, w odróżnieniu od metody elementów skończonych, stosuje się nierówno odległy rozkład węzłów w elementach, a do przybliżenia wartości międzywęzłowych wykorzystuje wielomiany Lagrange'a wyższego stopnia. Takie podejście pozwala na zmniejszenie liczby węzłów na długości fali do około 5, a także gwarantuje, że otrzymana macierz mas przyjmuje formę diagonalną. Modelowanie sygnałów czasowych prędkości fal sejsmicznych odbywa się na podstawie tensora momentu sejsmicznego, opisującego układ sił w źródle sejsmicznym. Podstawy matematyczne metody zostały przedstawione w pracach (Komatitsch, Tromp 1999, 2002).

W artykule zostaną przedstawione wyniki obliczeń numerycznych przy użyciu metody SEM dla wybranego wstrząsu sejsmicznego z obszaru GZW. Do obliczeń zastosowano oprogramowanie SpecFEM3D (www.geodynamics.org/cig/software/specfem3d), napisane w języku Fortran 2003

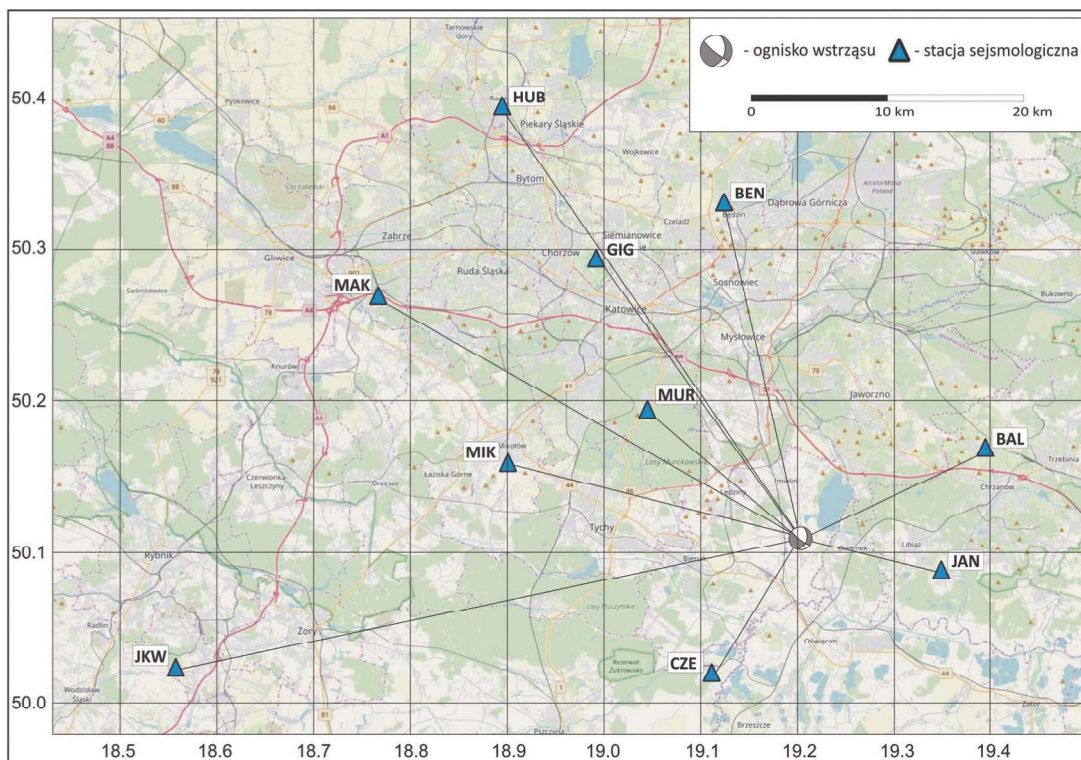
i wykorzystujące programowanie równoległe w oparciu o protokół komunikacyjny MPI (*Message Passing Interface*). Oprogramowanie jest wydane na licencji wolnego oprogramowania GNU (Komatitsch i in. 2018).

2. Opis analizowanych danych

Do analizy wybrano wstrząs górniczy, który wystąpił w dniu 17.04.2018 r. o godzinie 09:46 w kopalni KWK Piast-Ziemowit, znajdującej się na obszarze GZW. Współrzędne geograficzne wstrząsu wyniosły: 50.1069N i 19.2009E, a magnituda wstrząsu to 2.7 w skali Richtera. Na podstawie sygnałów zarejestrowanych przez kopalnianą sieć sejsmologiczną, wstrząs został zlokalizowany na głębokości 290 m p.p.m. Należy jednak pamiętać, że wyznaczona głębokość ogniska może być tutaj obarczona dużym błędem. Wynika to z niewielkiego zróżnicowania głębokości usytuowania stanowisk pomiarowych w sieci sejsmologicznej i co za tym idzie, niewielkiej rozdzielczości lokalizacji składowej pionowej.

Analizowany wstrząs został zarejestrowany przez Górnośląską Regionalną Sieć Sejsmologiczną (www.grss.gig.eu), będącą częścią rozproszonych infrastruktur badawczych w dziedzinie nauk o Ziemi, działających w ramach Tematycznego Węzła Zagrożeń Antropogenicznych (*Thematic Core Service Anthropogenic Hazards*) projektu EPOS. Celem tego projektu jest integracja poligonów pomiarowych procesów geodynamicznych na terenach górniczych i pogórnich, akwizycja rozproszonych danych, a następnie udostępnianie ich na platformie cyfrowej IS-EPOS (https://tcs.ah-epos.eu). Projekt EPOS jest największym europejskim projektem infrastrukturalnym w naukach o Ziemi.

Rys. 1 przedstawia omawiany obszar wraz z naniesionym położeniem ogniska wstrząsu oraz stacjami sejsmologicznymi sieci GRSS, uwzględnionymi w analizie.



Rys. 1. Mapa omawianego obszaru wraz z położeniem ogniska wstrząsu i powierzchniowych stacji sejsmologicznych

Fig. 1. Map of the area, including the location of the tremor and seismological stations

Na podstawie zarejestrowanych sygnałów sejsmicznych obliczony został mechanizm analizowanego wstrząsu. Wyrażony jest on poprzez tensor momentu sejsmicznego, opisującego rozkład sił w źródle sejsmicznym, jako kombinację par sił z momentem. Przemieszczenia w dalekim polu falowym wywołane przez układ sił w źródle są sumą przemieszczeń wywołanych przez poszczególne pary sił (Aki, Richards 1980). Obliczenia tensora momentu sejsmicznego wykonano przy użyciu programu Foci (Kwiątek 2009). Na podstawie mechanizmu ogniska z dużym (83%) udziałem składowej ścinającej można wnioskować, że przyczyną zaistniałego wstrząsu było odprężenie mas skalnych w rejonie uskoku tektonicznego, do którego dołożyły się naprężenia wywołane bieżącą eksploatacją górnictwem w rejonie uskoku.

Wynik obliczeń tensora momentu sejsmicznego wraz z kątowymi parametrami płaszczyzn nodalnych oraz naprężeń kompresyjnych (P) i tensyjnych (T) przedstawia rys. 2. Jest to rozwiązanie pełnego tensora, dla którego wyróżnia się składową zmiany objętości (ISO), składową jednoosiowego ściskania lub rozciągania (CLVD) i składową ścinania (DC). Wstrząs ten charakteryzował się mechanizmem poślizgowym normalnym.

Pełny tensor rozłożony na składową zmiany objętości (ISO), składową jednoosiowego ściskania lub rozciągania (CLVD) i składową ścinania (DC) wskazuje, że w rozwiązaniu dominuje składowa ścinania (83%) nad jednoosiowym ściskaniem (13%) i eksplozją (4%). Mechanizm ogniska wskazuje na mechanizm ścinający typu uskoku przesuwczego. Płaszczyzny nodalne mają azymut NW-SE (płaszczyzna A $\Phi^\circ = 131^\circ$, $j = 76^\circ$) lub (płaszczyzna B $\Phi^\circ = 19^\circ$, $j = 34^\circ$). Naprężenia główne kompresyjne (P) działają pod kątem 49° , a naprężenia tensyjne (T) pod kątem 24° .

Analizowany wstrząs górotworu był skutkiem eksploatacji pokładu węgla zalegającego na głębokości około 426 m p.p.m. Ważnym czynnikiem decydującym o wyborze do analizy właśnie tego zjawiska był fakt, że na obszarze kopalni działa podziemna sieć sejsmologiczna, prowadząca ciągły monitoring drgań górotworu, a w bezpośrednim sąsiedztwie

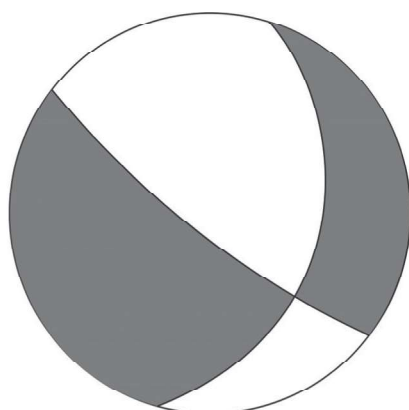
ogniska wstrząsu było zainstalowane stanowisko pomiarowe, wyposażone w sondę DLMPPV. Znajdowało się ono w odległości około 190 m od ogniska wstrząsu. Schemat wyrobisk górniczych w badanym rejonie pokazuje rys. 3.

Profil litologiczny, pokazujący budowę geologiczną w rejonie wystąpienia wstrząsu, wykonany na podstawie otworów wiertniczych oraz pomiarów w wyrobiskach chodnikowych przedstawia rys. 4. Miąższość pokładu węgla waha się od 3.1 m do 3.4 m. W stropie pokładu lokalnie występują ilowce i mułowce (od 0 m do 4m), a następnie piaskowce różnoziarniste o miąższości od 102 m do 115 m. W spągu lokalnie występują łupki ilaste (do 5 m miąższości), a poniżej piaskowce różnoziarniste o miąższości od 28 m do 34 m. Pokład węgla w eksploatowanym polu ścianowym charakteryzuje się niewielkimi nachyleniami.

3. Budowa modelu obliczeniowego

Na podstawie danych geologicznych i górniczych przedstawionych w paragrafie 2 zbudowany został model obliczeniowy, który posłużył do odwzorowania pełnego obrazu falowego w analizowanym obszarze. Rys. 5 przedstawia siatkę punktów, skonstruowaną do obliczeń przebiegów falowych. Model wykonano w lokalnym układzie współrzędnych i pokrywa on obszar o powierzchni 0.41 km². Odległość pionowa pomiędzy ogniskiem wstrząsu a analizowanym wyrobiskiem wynosi 130 m. W obliczeniach przyjęto głębokość modelu równą 260 m, z pokładem węgla o miąższości 4 m, zalegającym pomiędzy -136 m, a -140 m. Siatka pomiarowa składa się z 1 663 767 elementów, a każdy posiada 125 punktów węzłowych. Po odjęciu punktów wspólnych, leżących na brzegach elementów, daje to liczbę 110 581 263 węzłów w całym modelu (331 743 789 stopni swobody, ponieważ dla każdego punktu siatki są poszukiwane składowe przemieszczenia w trzech kierunkach). Najmniejsza i największa odległość pomiędzy węzłami wynosi odpowiednio 0.69 m i 1.31 m. Przyjmując, że dla pełnego odtworzenia przebiegu falowego wystarczy pięć próbek na długość fali (Seriani, Priolo 1994), otrzymujemy, że dla zastosowanego modelu możemy uzyskać rozwiązania dla fal o częstotliwości do 150 Hz.

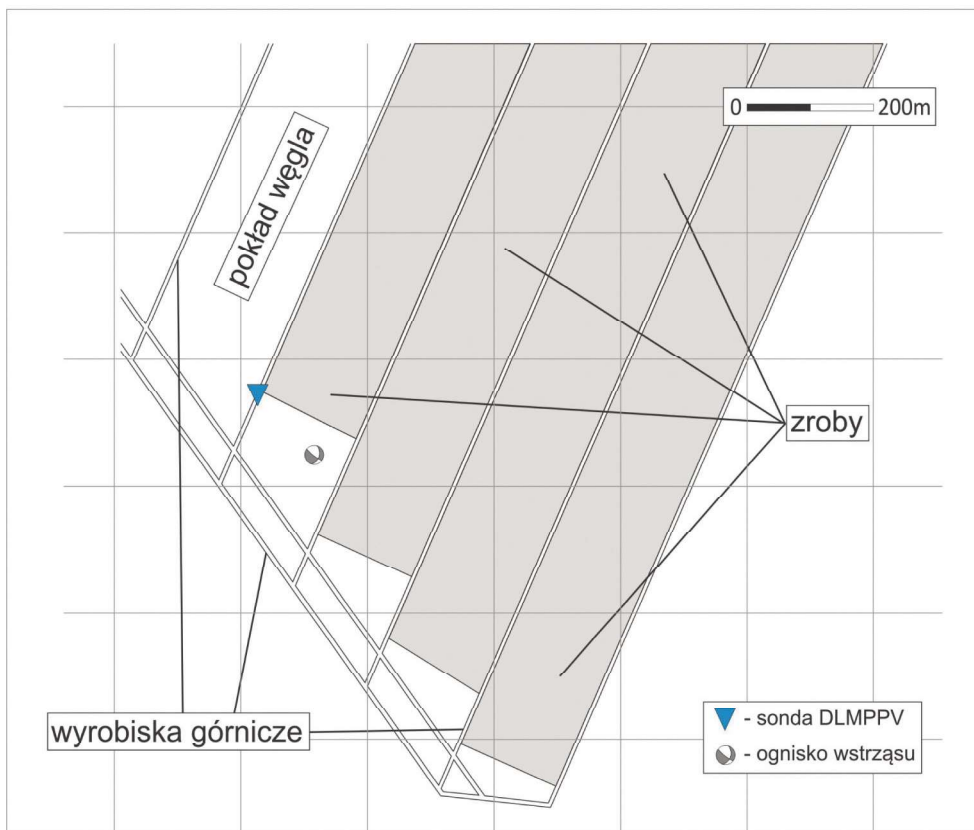
Typ mechanizmu: poślizgowy normalny



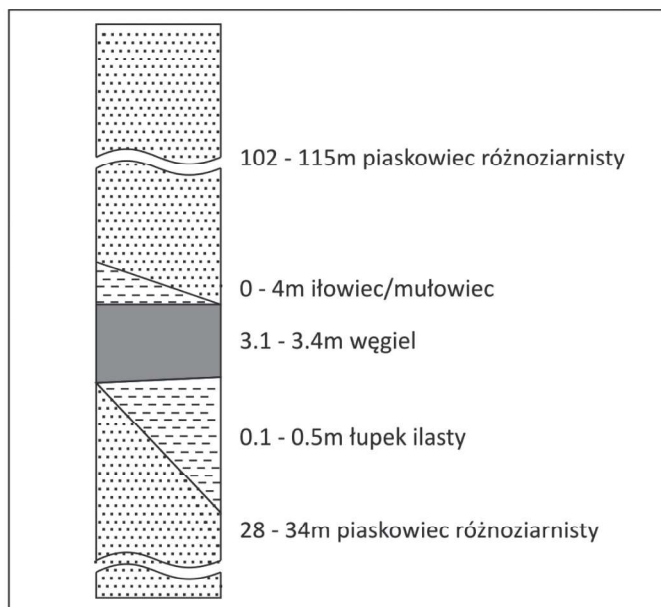
Płaszczyzny nodalne		Osie naprężeń		Składowe tensora, %		
A Φ°/δ° λ°	B Φ°/δ° λ°	P Φ°/δ°	T Φ°/δ°	ISO	CLVD	DC
131/76 -122	19/34 -26	6/49	245/24	4	13	83

Rys. 2. Parametry rozwiązania mechanizmu ogniska wstrząsu (Φ_A, B – azymut płaszczyzny A, B, δ_A, B – upad płaszczyzny A, B, λ – kat poślizgu Φ_P, T – azymut osi P, T, δ_P, T – zanurzenie osi P, T, ISO – procentowy udział składowej izotropowej, CLVD – procentowy udział składowej odpowiadającej jednoosiowemu ściskaniu +/- lub rozciąganiu +/-, DC – procentowy udział składowej ścinającej)

Fig. 2 Parameters for the solution of the focal mechanism of the tremor (A and B Φ – plane azimuths of A and B; A and B δ – dip of planes A and B; λ – shear angle; P and T Φ – azimuths of axes P and T; P and T δ – immersions of P and T; ISO axes – percentage of isotropic component; CLVD – percentage of component corresponding to uniaxial compression +/- or tension +/-; DC – percentage of shear component)



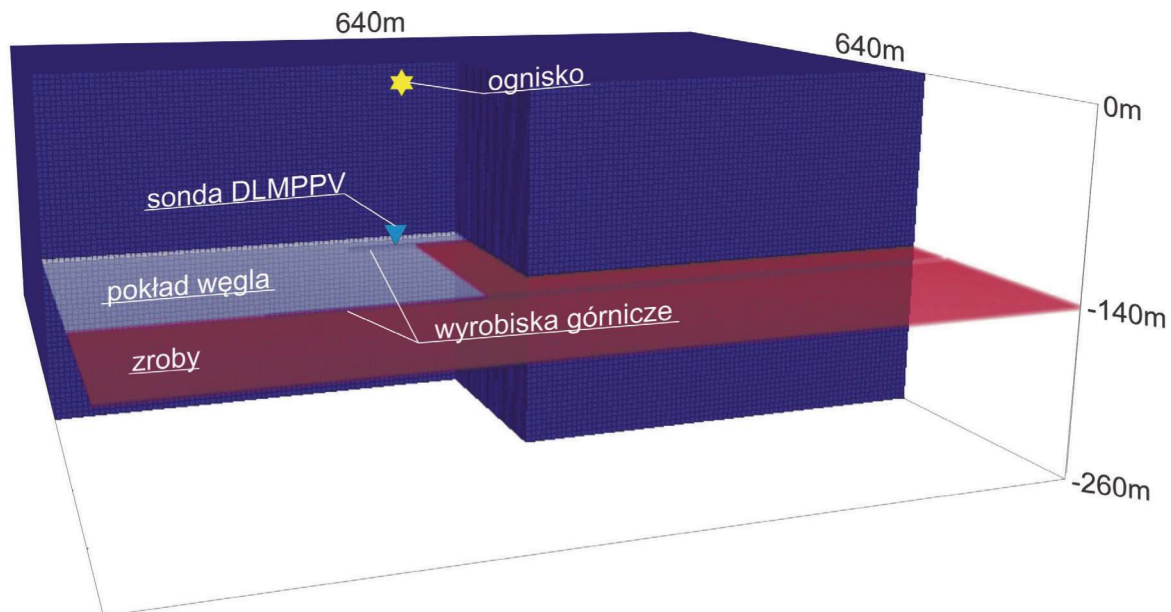
Rys. 3. Schemat wyrębisk górniczych wraz z lokalizacją sondy DLMPPV i ogniska wstrząsu
 Fig. 3. Diagram of mining excavations with the location of the DLMPPV probe and source of the tremor



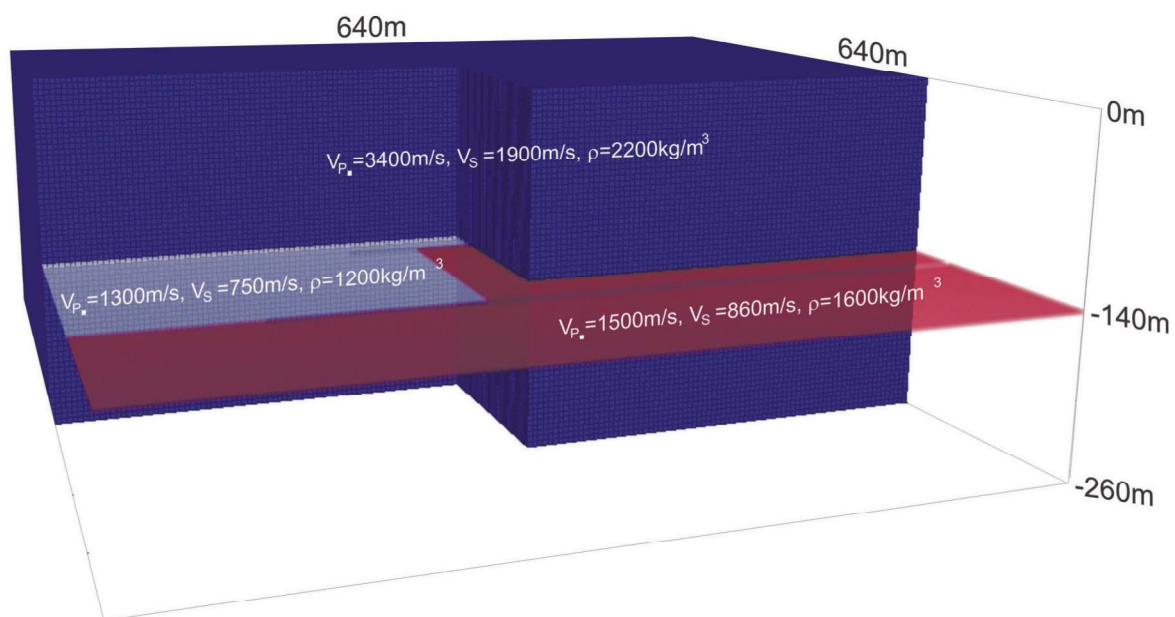
Rys. 4. Profil geologiczny w rejonie analizowanego wstrząsu
 Fig. 4. Geological profile in the area of the analyzed tremor

W obliczeniach przyjęto płasko-równoległy model prędkościowy z trzema warstwami. Każda warstwa ośrodka jest opisana przez prędkość propagacji fal sejsmicznych P i S oraz gęstość. W modelu uwzględniono również wybrane partie

pokładu węglowego. Na rys. 6 pokazano wartości prędkości i gęstości dla poszczególnych warstw modelu przyjęte w obliczeniach.



Rys. 5. Siatka pomiarowa użyta do obliczeń
Fig. 5. The measuring grid used for calculations



Rys. 6. Model gęstościowo-prędkościowy przyjęty w obliczeniach
Fig. 6. The density and velocity model adopted in the calculations

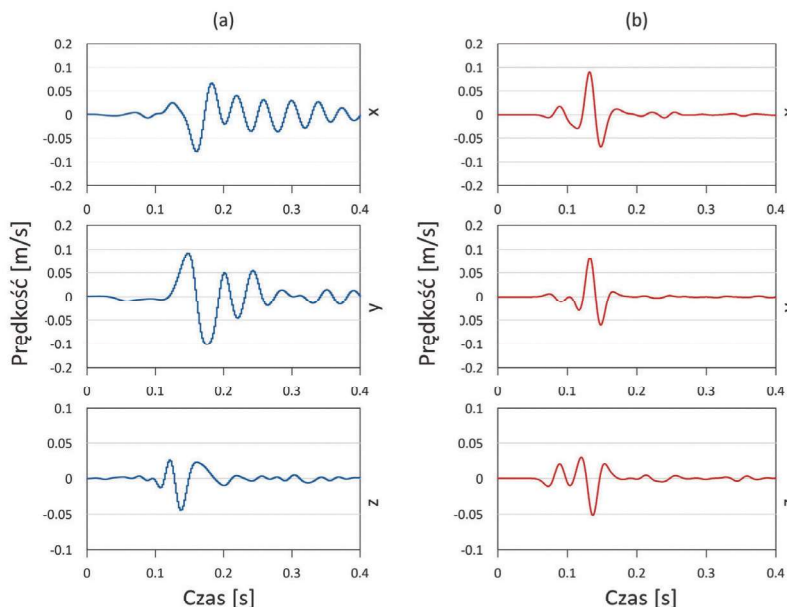
Ognisko wstrząsu jest zlokalizowane w centralnej części modelu, na głębokości - 6 m. Do obliczeń użyto funkcji źródłowej Gaussa z czasem trwania równym 0.02 s. Gęstość próbkowania wynosiła 12.5 kHz, a długość zapisu sejsmogramów syntetycznych 1.76 s, co daje 22 000 próbek dla każdego sygnału.

Obliczenia wykonano na superkomputerze Prometheus, będącym w posiadaniu Akademickiego Centrum Komputerowego AGH w Krakowie. Do modelowań wykorzystano 2 węzły obliczeniowe, każdy wyposażony w 20 procesorów z przydzieloną pamięcią 5GB, co w sumie daje 200 GB pamięci obliczeniowej.

4. Wyniki modelowań

Poniżej przedstawiono wyniki obliczeń wielkości drgań w otoczeniu podziemnego wyrobiska chodnikowego od wstrząsu zcharakteryzowanego w rozdziale 2. Wstrząs ten został zarejestrowany przez sondę pomiarową DLMPPV, zainstalowaną w odległości około 190 m od ogniska wstrząsu, a więc w odległości, która odpowiada bliskiemu polu falowemu. Istotne jest również to, że sonda była zainstalowana w strefie spągowej pokładu.

Na rys. 7 w części (a) pokazano zapis trzech składowych (x, y, z) zarejestrowanych rzeczywistych drgań górotworu, natomiast w części (b) obliczone dla tej samej lokalizacji sejsmogramy syntetyczne.



Rys 7. Rzeczywiste drgania, zarejestrowane na stanowisku DLMPPV (a) oraz wynik modelowań w programie SpecFEM3D dla tego stanowiska (b)

Fig 7. Real vibration recorded at the DLMPPV station (a) and the result of modeling in the SpecFEM3D program for this station (b)

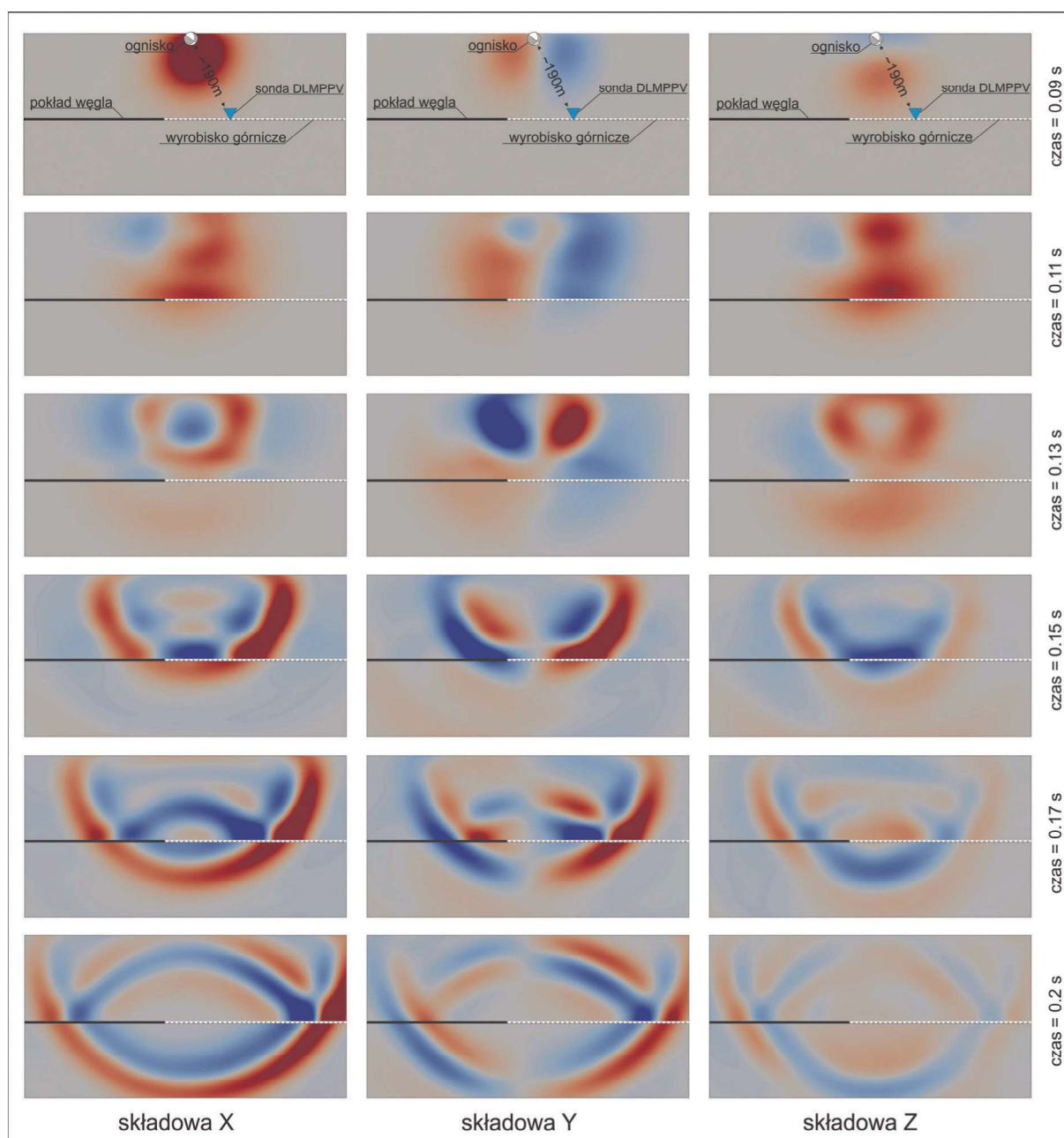
Obydwa zapisy zostały przefiltrowane przy użyciu filtra Butterwortha w paśmie od 0 Hz do 50 Hz. Szczytowe wartości amplitud prędkości drgań górotworu dla obu sygnałów są podobne i wynoszą około 0.1 m/s dla składowych poziomych drgań oraz około 0.05 m/s dla składowej pionowej. Czas trwania sygnału w przypadku składowej pionowej również jest porównywalny dla obu wykresów, natomiast w przypadku składowych poziomych czas ten dla przebiegów zmierzonych jest znacznie dłuższy. Jest to prawdopodobnie związane ze sposobem instalacji sondy pomiarowej i niecałkowitym wytłumieniem zarejestrowanego sygnału po przejściu fali sejsmicznej.

Analizując rzeczywiste zapisy drgań pochodzące z aparatury pomiarowej i obliczone zapisy syntetyczne, nie należy spodziewać się ich całkowitej zgodności. Na kształt rejestrowanego sygnału ma bowiem wpływ bardzo wiele czynników, takich jak budowa geologiczna ośrodka skalnego, w którym propaguje fala (przyjęty w obliczeniach model zawsze pozostaje tylko pewnym przybliżeniem ośrodka rzeczywistego) i związane z nią zjawiska falowe, którym podlega rozchodząca się fala, a także rzeczywisty rozkład sił w ognisku wstrząsu, czy wreszcie charakterystyka aparatury pomiarowej. Tym niemniej, porównując wykresy (a) i (b) z rys. 7 zauważa się wiele cech wspólnych dla tych przebiegów. Szczególnie wysoka zgodność jest widoczna w przypadku składowych pionowych. Jednak z punktu widzenia możliwości określania naprężeń, jakim poddawane jest wyrobisko podziemne w momencie przechodzenia fali sejsmicznej, decydujące są wartości drgań, a te, w przypadku obliczonych sejsmogramów syntetycznych wykazują dużą zgodność z wartościami pomiarowymi.

Lepszy ogląd tego, jak zachowuje się fala propagująca w ośrodku skalnym dają przekroje sejsmiczne, pokazujące wielkość amplitud drgań związanych z rozchodzącą się falą dla poszczególnych składowych drgań, w różnych momentach czasu, po wystąpieniu wstrząsu. Przekroje takie dla analizowanego wstrząsu pokazano na rys. 8.

Amplitudy drgań zostały przedstawione w rzucie pionowym na płaszczyźnie przechodzącej przez wyrobisko, w którym zainstalowana była sonda pomiarowa DLMPPV. Zaznaczono rzut ogniska wstrząsu na tę płaszczyznę oraz analizowany pokład węgla wraz z wydrążonym wyrobiskiem chodnikowym. Przekroje zostały wykonane we wspólnej skali i pokazują rozkład amplitudy drgań w poszczególnych kierunkach oraz pozwalają łatwo określić moment dojścia głównej fazy drgań do wyrobiska. Widać na nich również, jak fala sejsmiczna w chwili osiągnięcia głębokości zalegania pokładu węgla ulega odbiciu i część jej energii przechodzi głębiej do ośrodka, a część powraca w kierunku powierzchni. To, ile energii ulegnie odbiciu na granicy ośrodków zależy od parametrów sejsmicznych ośrodków skalnych, na granicy których dochodzi do odbicia fali. W przypadku gdy mamy do czynienia z warstwą odbijającą o małej miąższości, istotna jest również częstotliwość fali. Amplituda odbicia w przypadku cienkiej warstwy jest proporcjonalna do miąższości warstwy i odwrotnie proporcjonalna do długości fali. Odbicie fali na granicy warstwy o niewielkiej miąższości jest możliwe w przypadku, gdy miąższość ta jest większa niż $l/8$, gdzie l jest dominującą długością propagującej fali (Widess 1973) Na wcześniejszym rys. 7 przedstawiono zapisy drgań przefiltrowane w paśmie częstotliwości od 0 Hz do 50 Hz. Jednak pełne pasmo zarejestrowanego przez sondę DLMPPV sygnału jest znacznie szersze i obejmuje częstotliwości do około 100 Hz, co pokazuje rys. 9.

Wynika z tego, że w bliskim polu falowym, gdzie mamy do czynienia z szerokim pasmem częstotliwościowym propagującej fali, pokład węgla, różniący się znacząco własnościami fizycznymi od skał otaczających, nawet przy stosunkowo małej miąższości, może istotnie wpływać na zjawisko rozproszenia energii sejsmicznej przenoszonej przez propagującą w górotworze falę sejsmiczną. To powoduje, że, jak już wcześniej zasygnalizowano, miejsce instalacji czujnika pomiarowego w wyrobisku górniczym ma wpływ na



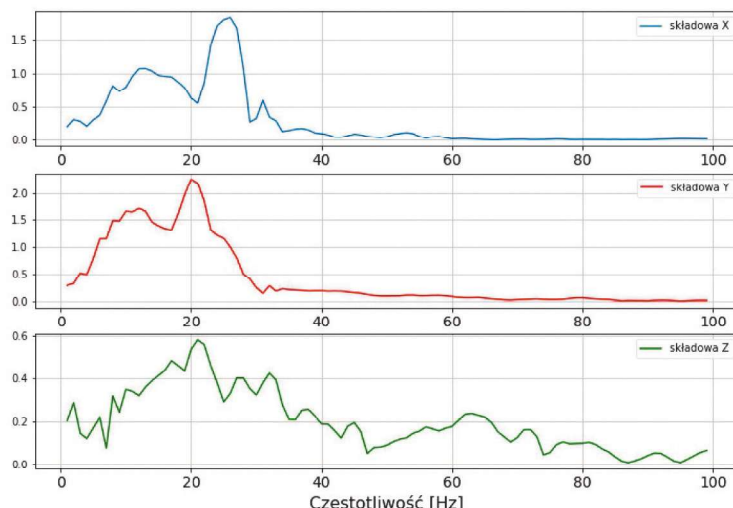
Rys. 8. Obraz pola falowego w różnych momentach czasu po wystąpieniu wstrząsu; kolor czerwony wskazuje dodatnie wartości prędkości, a kolor niebieski wartości ujemne

Fig. 8. Image of a wave field at various times after occurrence of the tremor; red indicates positive velocities, and blue indicates negative velocities

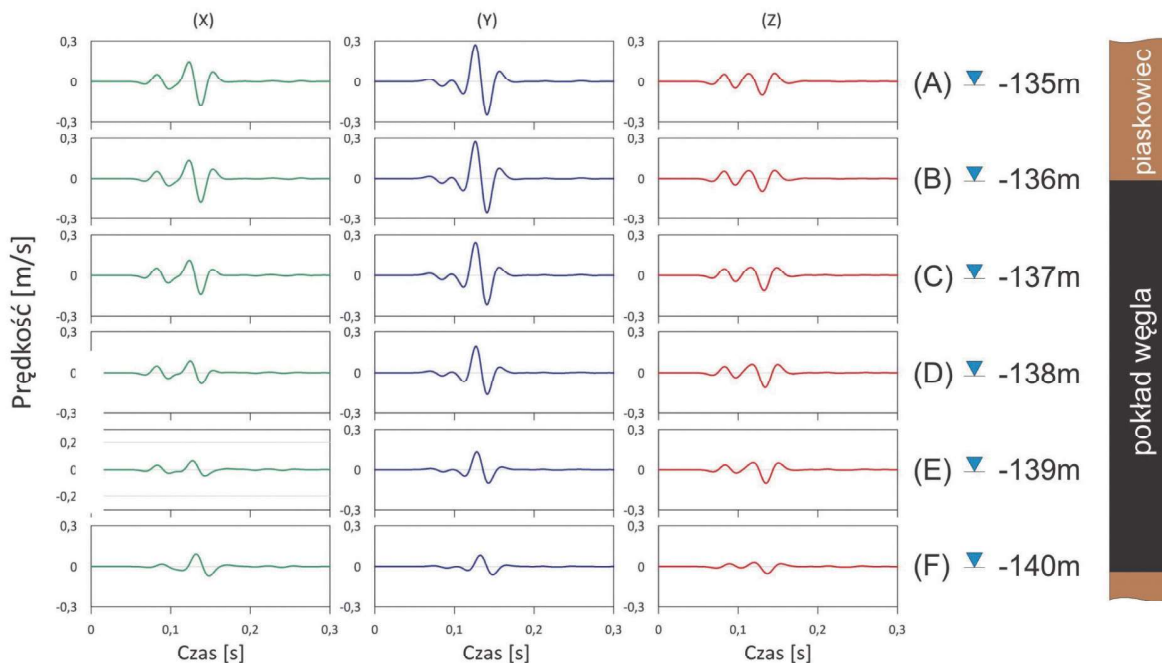
rejestrowane wartości drgań. Wyniki modelowań pokazują, że amplitudy drgań w obrębie pokładu węgla znacząco się różnią. Rys. 10 przedstawia obliczone sejsmogramy syntetyczne dla różnych lokalizacji wewnątrz i w bezpośrednim otoczeniu analizowanego pokładu węgla.

Punkt (F) położony jest w strefie spągowej pokładu węgla, na granicy z leżącymi poniżej warstwami piaskowca. Odpowiada to rzeczywistej lokalizacji sondy pomiarowej DLMPPV i obliczony sygnał to ten sam, który przedstawia rys. 7b. Punkt (A) znajduje się w skałach stropowych podkładu, zbudowanych z piaskowca, punkt (B) w stropie warstwy węglowej, natomiast punkty (C) ÷ (E) na różnych głębokościach w pokładzie węgla. Amplitudy drgań dla poszczególnych lokalizacji różnią się. Najwyraźniej widać to dla obliczonych wartości składowej Y drgań. W punkcie (A), znajdującym się

powyżej granicy odbijającej, szczytowe wartości drgań dla tej składowej wynoszą około 0.27 m/s, natomiast w strefie spągowej, na skutek rozproszenia energii po częściowym odbiciu fali, wartości amplitud drgań maleją do 0.06 m/s. Wewnątrz pokładu wartości te wynoszą odpowiednio: 0.24 m/s, 0.19 m/s i 0.13 m/s dla punktów położonych w odległości 1, 2 i 3 m poniżej stropu warstwy węglowej. Taki rozkład drgań wynika oczywiście z lokalizacji ogniska wstrząsu w skałach stropowych, co jest najczęstszym przypadkiem występującym w górnictwie węglowym. Zdarzają się również sytuacje, gdy w wyniku działalności górniczej dochodzi do naruszenia równowagi naprężeniowej i aktywacji stref uskokowych znajdujących się poniżej poziomu eksploatacyjnego. W takim przypadku mielibyśmy do czynienia z odwróconym rozkładem amplitud drgań w pokładzie.



Rys. 9. Widmo amplitudowe sygnału, zarejestrowanego przez sondę pomiarową DLMPPV
Fig. 9. Amplitude spectrum of the signal recorded by the DLMPPV measurement probe



Rys. 10. Sejsmogramy syntetyczne obliczone dla różnych lokalizacji sondy w obrębie i w otoczeniu pokładu węgla
Fig 10. Synthetic seismograms calculated for various locations of probe within and around the coal seam

5. Podsumowanie

Znajomość parametrów drgań ośrodka skalnego i wynikający z nich rozkład naprężeń dynamicznych w otoczeniu podziemnych wyrobisk górniczych ma decydujące znaczenie dla oceny stabilności tych wyrobisk i co z tego wynika, dla bezpiecznego prowadzenia robót górniczych. Jedną z metod umożliwiających obliczanie tych parametrów są modelowania numeryczne, dzięki którym możemy uzyskiwać pełny obraz falowy badanego obszaru po przejściu fali sejsmicznej. W artykule pokazano wyniki takich modelowań dla wstrząsu o magnitudzie 2.7 w skali Richtera. Wyniki obliczeń porównano z rzeczywistymi drganiami, zarejestrowanymi w wyrobisku górniczym, w bliskiej odległości od ogniska wstrząsu. Było to możliwe dzięki zastosowaniu specjalnych czujników o szerokim zakresie pomiarowym.

Należy podkreślić, że obliczone przebiegi wykazują dużą zgodność z przebiegami zarejestrowanymi. Wskazuje to na właściwy dobór parametrów modelu i potwierdza skuteczność metody. Przedstawienie wyników obrazowania falowego w postaci migawek (snapshots) w różnych momentach czasu po wystąpieniu wstrząsu pozwala łatwo śledzić zmiany w ośrodku skalnym, zachodzące pod wpływem propagującej fali sejsmicznej. Widać z nich, jak obecność pokładu węgla, pomimo stosunkowo niewielkiej miąższości, wpływa na obraz falowy. Duży kontrast parametrów fizycznych węgla w stosunku do skał otaczających i bliska odległość od ogniska wstrząsu, a co z tego wynika, szeroki zakres emitowanych częstotliwości fali sejsmicznej powodują, że na granicy pokładu węgla i skał otaczających dochodzi do częściowego odbicia fali i rozproszenia energii sejsmicznej.

Parametry drgań górotworu zostały obliczone w oparciu o tensor momentu sejsmicznego, który opisuje rozkład sił w źródle jako kombinację par sił z momentem. Analizowany wstrząs był najprawdopodobniej wynikiem odprężenia mas skalnych w rejonie uskoku, na co wskazuje duży udział składowej ścinającej mechanizmu ogniska.

Znajomość wartości szczytowych amplitudy prędkości drgań górotworu umożliwia wyznaczenie naprężeń dynamicznych, ale również wnosi istotną informację przy opracowywaniu kryteriów oceny zagrożenia tąpnięciem od wstrząsu, czy doborze obudowy chodnikowej. Może tym samym stać się uzupełnieniem dla metod analitycznych w rozwiązywaniu zagadnień związanych z poprawą bezpieczeństwa pracy w podziemnych kopalniach węgla zagrożonych występowaniem zjawisk dynamicznych.

Niniejszy artykuł został sfinansowany w ramach działalności statutowej Głównego Instytutu Górnictwa nr 11133029.

Podziękowania

Praca została wykonana z wykorzystaniem Infrastruktury PLGrid.

W artykule wykorzystano dane udostępnione na platformie IS-EPOS (<https://tcs.ah-epos.eu>) przez Polską Grupę Górniczą S.A, konsorcjanta projektu EPOS-PL.

Literatura

AKI K., RICHARDS P.G. 1980 - Quantitative Seismology - Theory and Methods, vol. 1, 2, San Francisco, W.H. Freeman and Co..

- CHODACKI J. 2019 - Zastosowanie metody elementów spektralnych do określania drgań gruntu od wstrząsów górniczych, „Przeгляд Górnicy” 9.
- DUBIŃSKI J., MUTKE G. 1996 - Characteristics of Mining Tremors within the Near-wave Field Zone, PAGEOPH, Vol. 147, No. 2 (1996).
- KOMATITSCH D., TROMP J. 1999 - Introduction to the spectral-element method for 3-D seismic wave propagation, Geophys J Int 139(3):806–822.
- KOMATITSCH D., TROMP J. 2002 - Spectral-element simulations of global seismic wave propagation – I. Validation”, Geophys. J. Int. (2002) 149, 390–412.
- KOMATITSCH D., TROMP J. 2002 - Spectral-element simulations of global seismic wave propagation–II. Three-dimensional models, oceans, rotation and self-gravitation”, Geophys. J. Int. (2002) 150, 303–318.
- KOMATITSCH D., VILOTTE J.P., TROMP J. (i zespół) 2018 - SPECFEM 3D Cartesian User Manual Version 3.0”, CNRS (France), Princeton University (USA) i ETH Zürich (Switzerland).
- KWIATEK G. 2009 - Foci – Tensor momentu sejsmicznego – Parametry Spektralne, opis programu (publikacja internetowa www.sejsmologia-gornicza.pl/foci/).
- MC GARR A., GREEN R.W.E., SPOTTISWOODE S.M. 1981 - Strong ground motion of mine tremors: source implications for near-source ground motion parameters, Bull. Seismol. Soc. Am., 71, 1981, 295–319.
- MUTKE G., MASNY W., PRUSEK S. 2016 - Peak particle velocity as an indicator of the dynamic load exerted on the support of underground workings, Acta Geodyn. Geomater., Vol. 13, No. 4 (184), 367–378.
- SERIANI G., PRIOLO E. 1994 - Spectral element method for acoustic wave simulation in heterogeneous media, Finite Elements in Analysis and Design 16 (1994) 337-348.
- WIDESS M.B. 1973 - How thin is a thin bed, Geophysics 1973, vol. 38, nr 6, s. 1176–1180.

Artykuł wpłynął do redakcji – luty 2019

Artykuł akceptowano do druku – 25.03.2020



LUBELSKI WĘGIEL
„BOGDANKA”
 SPÓŁKA AKCYJNA

KOPALNIA
 INTELIGENTNYCH
 ROZWIĄZAŃ

jestemy notowani w indeksach:
 mWIG40, WIG-GÓRNICZTWO, InvestorMS oraz Respect Index

www.lw.com.pl