PRZEGLĄD GEOFIZYCZNY

Rocznik LXV 2020 Zeszyt 3-4

Alicja CAPUTA, Łukasz RUDZIŃSKI

INSTYTUT GEOFIZYKI POLSKIEJ AKADEMII NAUK

SYNTETYCZNE TESTY INWERSJI PEŁNEGO POLA FALOWEGO W WARUNKACH RZECZYWISTEJ SIECI MONITORINGU SEJSMICZNEGO ZG RUDNA

SYNTHETIC TESTS OF FULL WAVEFORM INVERSION WITH CONFIGURATION OF RUDNA MINE REAL SEISMIC MONITORING SYSTEM

Wstęp

Wstrząsy sejsmicznie są częstym zjawiskiem związanym z eksploatacją surowców naturalnych, a ryzyko związane z ich występowaniem jest szczególnie wysokie w przypadku podziemnego wydobycia złóż. W kopalniach głębinowych, standardową procedurą jest ciągły monitoring sejsmiczny pozwalający na lokalizację stref zagrożeń i częściowe oszacowanie ryzyka. W tym celu instalowana jest sieć sejsmometrów pozwalających na lokalizację zjawisk oraz określanie ich magnitudy i/lub energii (Mendecki i in. 1999). W przypadku wielopokładowych złóż węgla, gdzie możliwe jest stworzenie trójwymiarowej sieci sejsmicznej oraz w przypadku złóż stratoidalnych, gdzie lokalizacja stacji pomiarowych nie jest silnie ograniczana przez zmienne przestrzennie ciało rudne, często rezygnuje się z kosztownych czujników trójskładowych na rzecz zwiększenia ilości czujników jednoskładowych (Potvin, Hudyma 2001; Hudyma, Brummer 2007). Taki zabieg może wpływać na obniżenie jakości danych, jednak pozwala na lepsze pokrycie siecią obszaru wydobycia. W efekcie skutkuje to zwiększeniem dokładności lokalizacji oraz polepszeniem czułości monitoringu, czyli możliwości wykrywania zjawisk o niższych magnitudach (Hudyma, Brummer 2007). To właśnie z tych względów część zakładów górniczych decyduje się na monitoring z użyciem sejsmometrów rejestrujących jedynie składową pionową drgań gruntu lub systemy mieszane tj. czujniki jedno- i trójskładowe (np. Koziarz, Szłapka 2010; Kozłowska, Orlecka-Sikora 2017; Leake i in. 2017).

W niektórych przypadkach dane z sejsmicznych sieci górniczych wykorzystuje się nie tylko do określania lokalizacji i energii zjawisk, lecz także do wyznaczenia bardziej zaawansowanych parametrów ogniska. W ich skład wchodzą m.in. mechanizmy ogniskowe wstrząsów. Analizy te przeprowadzane są przede wszystkim dla silnych zjawisk

 DOI: 10.32045/PG-2020-012

sejsmicznych w celu identyfikacji płaszczyzn uskoków oraz określenia naprężeń działających wewnątrz górotworu. Prace tego typu prowadzone były w Polsce wielokrotnie, zarówno dla kopalni miedzi jak i węgla (np. Lizurek, Wiejacz 2011; Stec 2012; Wojtecki i in. 2016).

Najprostszą metodą wyznaczania mechanizmów jest inwersja pierwszych wstąpień fal sejsmicznych, czyli danych (amplituda i polaryzacja) otrzymanych z zapisów sejsmicznych wstrząsów. Obliczenia wykonuje się w oparciu o wejścia fali P na sejsmogramach zawierających rzeczywiste przemieszczenia drgań gruntu w domenie czasu (Gibowicz, Kijko 1994). Szybkość obliczeń, dostępne oprogramowanie (np. Kwiatek i in. 2016) oraz względna prostota metody sprawia, iż od lat stosowana jest ona w polskim górnictwie zarówno węgla jak i miedzi (m.in. Stec, Wojtecki 2011; Lizurek i in. 2015; Wojtecki i in. 2016; Talaga i in. 2017).

Metoda oparta o inwersję pierwszych amplitud ma jednak swoje zalety oraz wady. Oprócz prostoty jaką daje analiza w domenie czasu i możliwości wizualnej inspekcji zapisu, ważną z praktycznego punktu widzenia zaletą jest analiza jedynie pierwszej części zapisu. W tej sytuacji, nawet dla sieci o niskiej dynamice przy większych wstrząsach część ta pozostaje nieprzesterowana (Rudziński i in. 2016, 2017). Niestety jest to metoda czuła na błędy i niedokładności przyjętego modelu ośrodka geologicznego, zwłaszcza w przypadku niskoenergetycznych wstrząsów, których długość fali może być mniejsza niż wielkość niejednorodności ośrodka przez który przechodzi (Cesca i in. 2006). W przypadku wstrząsów o małych magnitudach oraz w obecności szumu sejsmicznego problematyczne może także okazać się określenie pierwszego wstąpienia fali P (Caputa i in. 2015). Problematyka ta dotyczy głównie zjawisk sejsmicznych o niskiej energii i na małych głębokościach, dlatego często opisane komplikacje dotyczą sejsmiczności indukowanej. Główną słabością rozwiązań w domenie czasu jest jednak wysoka czułość wyników na pokrycie azymutalne sieci. W przypadku sieci dołowych bardzo dobre pokrycie całego obszaru kopalni nie zawsze jest warunkiem możliwym do spełnienia. Koniecznym staje się więc znalezienie narzędzia umożliwiającego stabilne wyznaczanie mechanizmów ogniskowych wstrząsów górniczych, również w granicznych częściach kopalni i miejscach o słabszym pokryciu stanowiskami pomiarowymi. Narzędziem takim może być inwersja większej części sejsmogramu w domenie częstotliwości (Cesca i in. 2006; Rudziński 2013). Inwersja tensora momentu sejsmicznego z pełnego pola falowego była wcześniej z powodzeniem stosowana dla sieci regionalnych i lokalnych (Cesca i in. 2010, 2013; Rudziński i in. 2016), a także sieci kopalnianych (Rudziński 2013; Sen i in. 2013; Cesca, Grigoli 2015; Ma i in. 2018). Jak dotąd nie była jednak testowana pod kątem stabilności rozwiązań dla zjawisk o różnych mechanizmach źródłowych, różnych energiach i w warunkach różnego pokrycia siecią pomiarową.

W pracy przedstawiono analizę możliwości wykorzystania inwersji pełnego pola falowego w domenie częstotliwości i czasu w warunkach rzeczywistej, dołowej sieci monitoringu sejsmicznego wraz z jakościowym określeniem przydatności tej metody do wyznaczania mechanizmów ogniskowych wstrząsów górniczych. W tym celu przygotowaliśmy szereg testów opartych na analizach sejsmogramów syntetycznych obliczonych

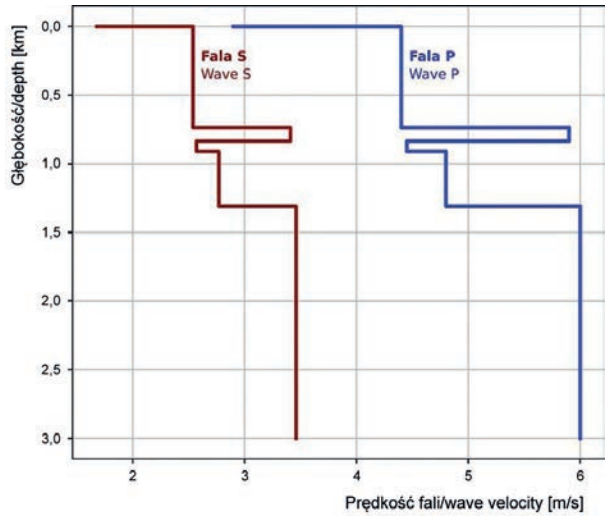
dla różnych lokalizacji w obrębie kopalni. Testy przeprowadzone zostały dla geometrii dołowej sieci sejsmicznej ZG Rudna w Polkowicach.

Wyznaczanie mechanizmu ogniska na podstawie inwersji pełnego pola falowego

W ogólności mechanizm ogniskowy zjawiska sejsmicznego reprezentowany jest za pomocą tensora momentu sejsmicznego MT (z ang. *Moment Tensor*) (Jost, Herrmann 1989). Tensor ten jest formalną reprezentacją dziewięciu par sił działających w źródle wstrząsu (Aki, Richards 2002) przy czym, ze względu na zasadę zachowania momentu pędu, jest tensorem symetrycznym i posiada jedynie sześć niezależnych składowych. Mechanizm ogniska można obliczyć poprzez rozwiązanie płaszczyzn uskoku zakładając działanie w źródle podwójnej pary sił DC (z ang. *Double-Couple*) lub poprzez rozwiązanie pełnego tensora momentu sejsmicznego MT. W obu przypadkach należy założyć, że siły związane z pękaniem górotworu miały charakter punktowy. Pierwszy typ rozwiązań jest prostszy do uzyskania, ale jego zastosowanie ogranicza się do założenia, że do wstrząsu doszło na uskoku, a w jego źródle działały tylko siły ścinające, co nie jest regułą w sejsmologii górniczej (Hasegawa i in. 1989). W przypadku pełnego rozwiązania MT nie ograniczamy się jedynie do działania podwójnej pary sił, ale otrzymujemy również informację o zmianach izotropowych (ang. *Isotropic* – ISO) oraz liniowym dipolu skompensowanym (ang. *Compensed Linear Vector Dipol* – CLVD). Część izotropowa MT opisuje objętościowe zmiany w źródle, natomiast liniowy dipol skompensowany dostarcza informację o działaniu jednoosiowego rozciągania lub ściskania w hipocentrum wstrząsu. W konsekwencji rozwiązanie MT jest pełniejsze i posiada interpretację fizyczną dla różnych od DC modeli źródeł w kopalniach (Hasegawa i in. 1989).

Informacji na temat MT nie da się uzyskać wprost. W tym celu konieczne jest zastosowanie metod inwersji, w których danymi wejściowymi są informacje zapisane na sejsmogramach stacji zlokalizowanych wokół ogniska. Następnie poszukiwany jest model mechanizmu w źródle, dla którego dopasowanie danych syntetycznych jest najbardziej zbliżone do danych rzeczywistych. W analizowanym przypadku inwersji podlegają syntetyczne zapisy sejsmiczne uwzględniające rejestrację całego sejsmogramu, który może zawierać fale P, S oraz fale powierzchniowe.

W praktyce do wyznaczenia mechanizmu ogniskowego konieczna jest znajomość funkcji Greena, zawierająca informację na temat fizycznych właściwości ośrodka geologicznego przez który podąża fala sejsmiczna. W analizowanym przypadku funkcja obliczona została na podstawie jednowymiarowego, warstwowego modelu prędkościowego ośrodka geologicznego przedstawionego na rysunku 1. Bazę danych funkcji Greena obliczono z użyciem oprogramowania *QSeis* (Wang 1999), przy zachowaniu geometrii rzeczywistej sieci dołowej ZG Rudna. Na potrzeby pracy inwersje wykonane zostały przy zastosowaniu programu Kiwi Tools (http://kinherd.org) (Heimann 2011; Cesca, Heimann 2013; Cesca i in. 2013) oraz pakietu Pyrocko (Heimann i in. 2017).

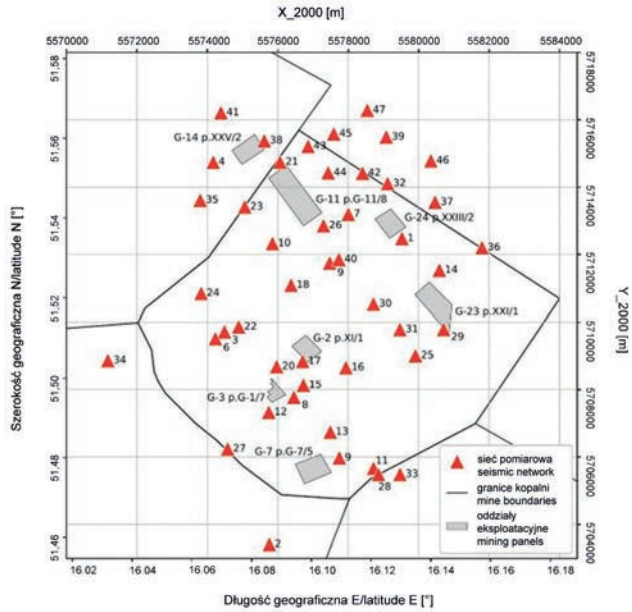


Rys. 1. Uproszczony model prędkościowy 1D wykorzystany do generacji bazy funkcji Greena
Fig. 1. Simplified 1D velocity model used for Green's function database generation

Procedura zakłada estymację mechanizmu w dwóch etapach. W części pierwszej przy zastosowaniu inwersji w domenie częstotliwości otrzymujemy informację na temat azymutu biegu (φ), kąta upadu (δ) i poślizgu (λ) płaszczyzn nodalnych, momentu sejsmicznego (M_0) oraz lokalizacji ogniska wraz z wstępnym modelem mechanizmu. Ze względu na dopasowanie jedynie spektrum amplitudowego, które nie zawierają informacji o polaryzacji, na tym etapie niemożliwe jest wyznaczenie osi ściskania i rozciągania. W tym celu konieczne jest przeprowadzenie drugiego kroku analizy, tym razem w domenie czasu. Podczas drugiej części analizy, dzięki dopasowaniu sejsmogramów, otrzymujemy pełny mechanizm wstrząsu. Następnie przeprowadzana jest dekompozycja tensora na składowe ISO, CLVD i DC. Metody te zostały przetestowane wcześniej dla sejsmiczności antropogenicznej, w tym górniczej zarówno dla danych z sieci powierzchniowych (Rudziński i in. 2016, 2017) oraz z sieci dołowych (Rudziński 2013; Sen i in. 2013; Ma i in. 2018).

Charakterystyka sieci oraz danych syntetycznych

Testy przeprowadzone zostały dla typowej dołowej sieci działającej w polskiej kopalni. W pracy posłużyliśmy się geometrią rozłożenia sejsmometrów z kopalni miedzi Rudna w Polkowicach (rys. 2). Jest to sieć oparta na czujnikach krótkookresowych, złożona z 47 pionowych sejsmometrów Willmore MkIII (1-100 Hz), skonfigurowanych w jeden system sejsmiczny ELOGOR-C (Koziarz, Szłapka 2010; Talaga i in. 2017). Czujniki zlokalizowane są głównie na poziomie złoża tj. na głębokości od 650 m do 1150 m p.p.t. oraz w szybach na różnej głębokości. Sposób rozmieszczenia sieci pozwala na rejestracje zjawisk ze wszystkich obecnie aktywnych oddziałów eksploatacyjnych ZG Rudna.



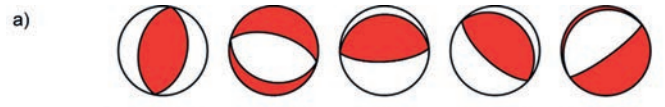
Rys. 2. Mapa sieci monitoringu sejsmicznego ZG Rudna wraz z lokalizacja oddziałów przyjętą w trakcie analizy

Fig. 2. Map of Rudna mine seismic monitoring system with location of analyzed mining panels

Zakres dynamiczny systemu wynosi około 66 dB (Koziarz, Szłapka 2010), a sygnały rejestrowane są z częstotliwością 500 próbek/sek. Wraz z dużą ilością stacji pomiarowych daje to możliwość lokalizacji epicentralnej zjawisk z dokładnością do około 50 m. Płaska geometria sieci wpływa jednak na błąd lokalizacji głębokości, który wynosi nawet 200 m (Rudziński, Dębski 2011).

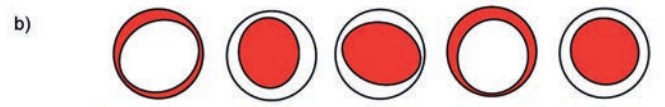
Dane syntetyczne wykorzystane w prezentowanym badaniu tworzył zestaw sejsmogramów obliczonych z założeniem lokalnego modelu prędkości (rys. 1) i rzeczywistej geometrii dołowej sieci monitoringu sejsmicznego ZG Rudna (rys. 2). Sejsmogramy zostały przygotowane dla 10 różnych, „wyidealizowanych" modeli źródeł (rys. 3) rozmieszczonych w różnych miejscach w obrębie kopalni. Lokalizacje zostały wybrane dla siedmiu oddziałów (rys. 2) o różnej aktywności sejsmicznej, innej głębokości eksploatacji oraz zmiennym pokryciu azymutalnym sieci sejsmicznej. Założone modele źródła przyjęte do analizy zostały podzielone na dwie grupy. Grupa 1 to 5 zjawisk w pełni ścinających (100% składowej DC) różniących się od siebie azymutem płaszczyzn nodalnych (rys. 3a). Modele te zostały przygotowane w celu imitacji mechanizmów ogniskowych źródeł występujących na uskokach lub nieciągłościach. Zjawiska takie w warunkach górniczych mogą powstać przede wszystkim w obszarach zaangażowanych tektonicznie, gdzie na skutek zmian naprężeń związanych z prowadzoną eksploatacją dochodzi do ścięcia nierówności na już istniejących uskokach i w efekcie do emisji fali sejsmicznej.

a)



	model 1	model 2	model 3	model 4	model 5
strike / bieg [°]	190	105	87	132	237
dip / upad [°]	45	30	70	68	10
rake / ślizg [°]	89	-90	90	90	-87

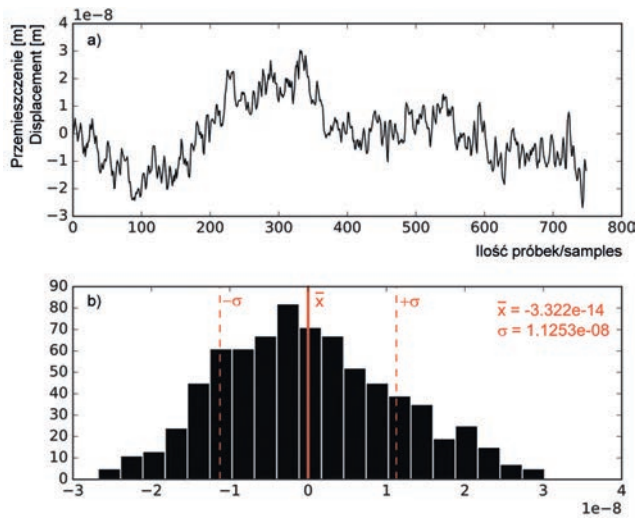
b)



	model 1	model 2	model 3	model 4	model 5
ISO [%]	-26	14	19	-24	18
CLVD [%]	-59	61	47	-68	76
DC [%]	14	25	34	8	6

Rys. 3. a) modele źródeł ścinających przyjęte do analizy,
b) – modele źródeł nieścinających przyjęte do analizy

Fig. 3. a) analyzed models of shear sources, b) – analyzed models of non-shear sources



Rys. 4. Przykładowy rysunek analizy szumu dla jednej ze stacji

Fig. 4. An example plot of noise analysis

Grupa 2 to 5 zjawisk o zmiennym rozkładzie składowych w pełnym MT (rys 3b). Źródła te zostały wymodelowane biorąc pod uwagę występowanie zjawisk sejsmicznych o skomplikowanych mechanizmach źródłowych, często z wysokim udziałem składowej CLVD (np. Dubiński 2013; Lizurek i in. 2015; Rudziński i in. 2016; Caputa, Rudziński 2019). Ten typ mechanizmów może być związany z pękaniem filarów oraz pękaniem i rozwarstwianiem skał stropowych w przypadku wstrząsów bezpośrednio nad złożem (Malovichko, Aswegen 2013). Dodatkowo do każdego z sejsmogramów dodano odpo-

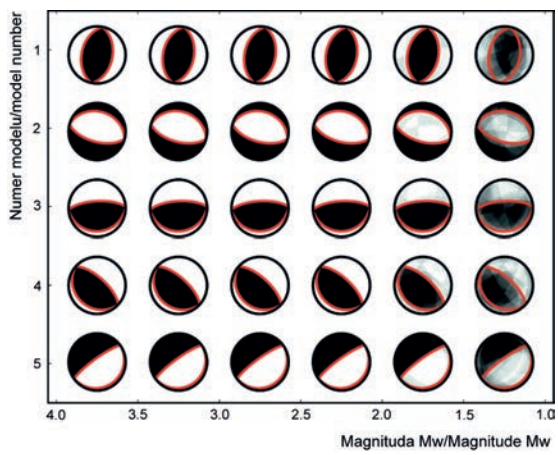
wiedni poziom szumu sejsmicznego. Szum został przygotowany dla każdej ze stacji w oparciu o rzeczywiste zapisy ze stacji pomiarowych. Przykład analizy szumu został przedstawiony na rysunku 4. Dla tak wygenerowanej bazy danych syntetycznych celem było sprawdzenie jakości rozwiązania mechanizmów w procesie inwersji, w różnej lokalizacji względem sieci.

Sejsmogramy syntetyczne dla każdego z przygotowanych modeli źródłowych, w każdej z lokalizacji, zostały dodatkowo wygenerowane dla 10-ciu różnych magnitud z przedziału $1.0 < M < 4.0$. W efekcie ostateczna baza danych zawierała zestaw sejsmogramów syntetycznych dla 700 źródeł (2 grupy po 5 modeli dla 7 lokalizacji i 10 różnych magnitud).

Wyniki

Mechanizmy ogniskowe źródeł ścinających

W pierwszej kolejności przeanalizowane zostały rozwiązania dla modeli ścinających (grupa 1, rys. 3a). Inwersję danych syntetycznych przeprowadzono w domenie czasu i częstotliwości. Na rysunku 5 pokazane są zbiorcze wyniki dla wszystkich badanych zjawisk w relacji z wielkością zjawiska (tj. z magnitudą). Mechanizmy prezentowane są w formie tzw. „niewyraźnych piłek plażowych" (ang. *fuzzy beachballs*). Rysunek przedstawia wyniki analizy rozwiązania ścinającego i jest reprezentacją rzutu płaszczyzn nodalnych na dolną hemisferę wraz z oznaczonym rozkładem pól kompresji i dylatacji w źródle. Uzyskane rezultaty wskazują, że obliczone mechanizmy są stabilne niezależnie od azymutu płaszczyzn nodalnych, jednak elementem warunkującym zaburzenie wyni-

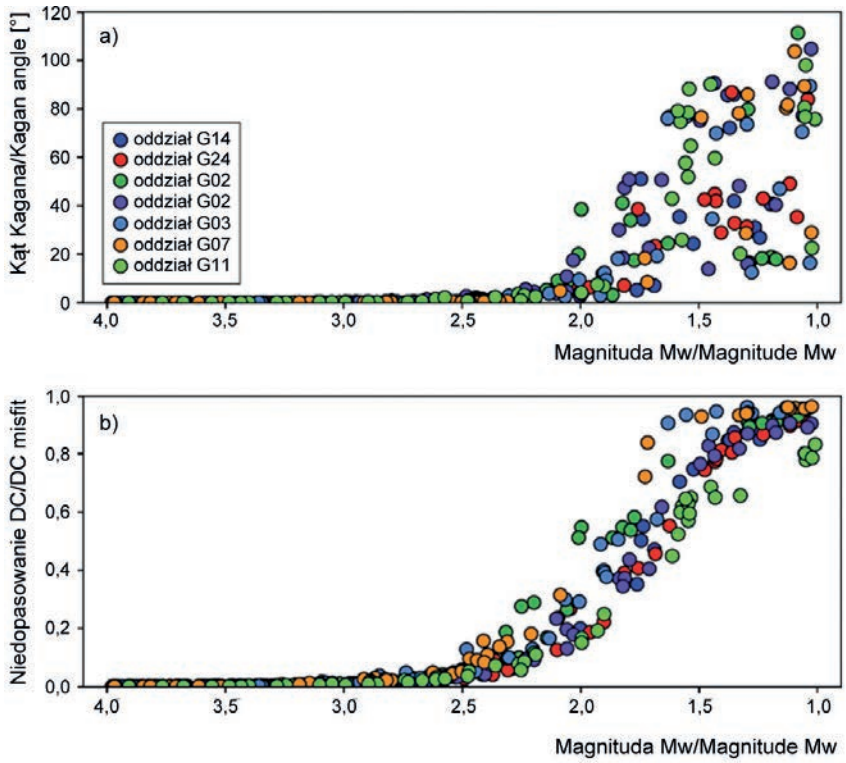


Rys. 5. Niewyraźne piłki plażowe (Fuzzy beachballs) obliczone
dla wszystkich modeli źródeł ścinających względem siły wstrząsu (magnitudy)

Fig. 5. Fuzzy beachballs calculated for all models
of shear sources vs. strength of tremor (magnitude)

ków jest siła wstrząsu – co wynika ze stosunku szum-amplituda. Rozwiązania mechanizmów źródłowych zaczynają być niezgodne z przyjętym modelem dla zjawisk poniżej $M = 2.0$. Należy jednak zauważyć, iż znacząca część rozwiązań pozostaje stabilna nawet w przedziale $2.0 > M > 1.5$.

Wynik ten potwierdza analiza kąta Kagana (Kagan 2005, 2007), który opisuje kąt pomiędzy azymutem płaszczyzn nodalnych rozwiązania modelowego, a azymutem płaszczyzn nodalnych rozwiązania otrzymanego po inwersji pełnego pola falowego. Na rysunku 6a widoczny jest gwałtowny wzrost wartości kąta Kagana poniżej magnitudy 2.0, co bezpośrednio wskazuje na zwiększającą się rozbieżność wyników w stosunku do mechanizmów modelowych wraz ze spadkiem magnitudy. Obserwację tą potwierdza także niedopasowanie danych syntetycznych do danych modelowych rozwiązań DC, widoczne na rysunku 6b.

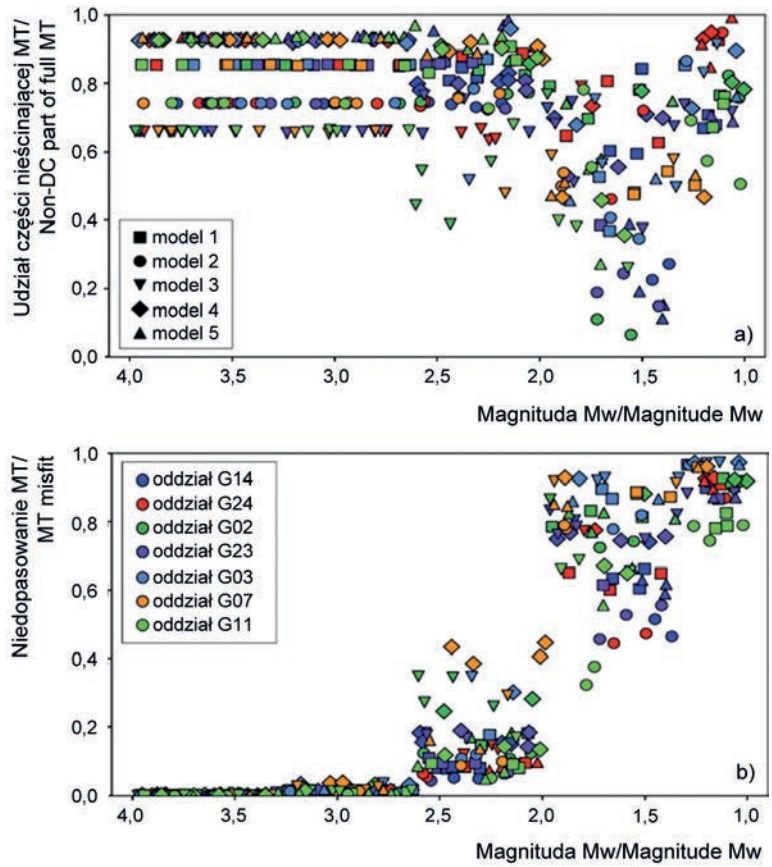


Rys. 6. Wyniki zbiorcze analizy tensora momentu sejsmicznego (MT) dla źródeł ścinających (grupa 1); a – wyniki analizy zmienności kąta Kagana względem magnitudy, b – wyniki analizy niedopasowania danych syntetycznych do danych modelowych dla rozwiązań DC względem magnitudy

Fig. 6. Summary results of seismic moment tensor (MT) analysis of shear sources (group 1); a – results of analysis of Kagan angle versus magnitude, b – results of analysis of synthetic data misfit for dobuble-couple models versus magnitude

Mechanizmy ogniskowe źródeł nieścinających

W drugim kroku analizowanymi zjawiskami były wstrząsy o nieścinających mechanizmach ogniskowych. Zbiorcze wyniki dla grupy 2 zaprezentowane są na rysunku 7. W tym przypadku wartości składowej nieścinającej utrzymują stabilny poziom dla magnitud z przedziału $2.5 < M < 4.0$. Wstrząsy słabsze niż $M = 2.5$ prezentują zaburzone wyniki, a poziom składowej nieścinającej (non-DC) spada dla niektórych zjawisk nawet poniżej 20% udziału w pełnym rozwiązaniu. Dodatkowo wykres przedstawiający zależność pomiędzy magnitudą a niedopasowaniem danych syntetycznych do danych modelowych wskazuje na wzrost błędu rozwiązania już przy magnitudzie 2.6.

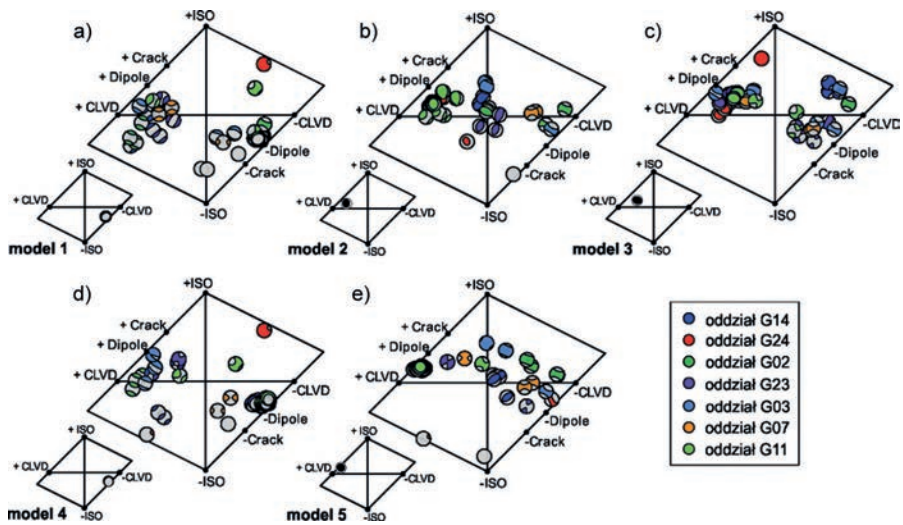


Rys. 7. Wyniki zbiorcze analizy tensora momentu sejsmicznego (MT) dla źródeł nieścinających (grupa 2); a – wyniki analizy udziału części nieścinającej MT w pełnym rozwiązaniu MT, b – wyniki analizy niedopasowania danych syntetycznych do danych modelowych dla rozwiązań pełnego MT

Fig. 7. Summary results of seismic moment tensor (MT) analysis of non-shear sources (group 2); a – results of analysis of non-DC part in full MT, b – results of analysis of synthetic data misfit for non-double-couple models

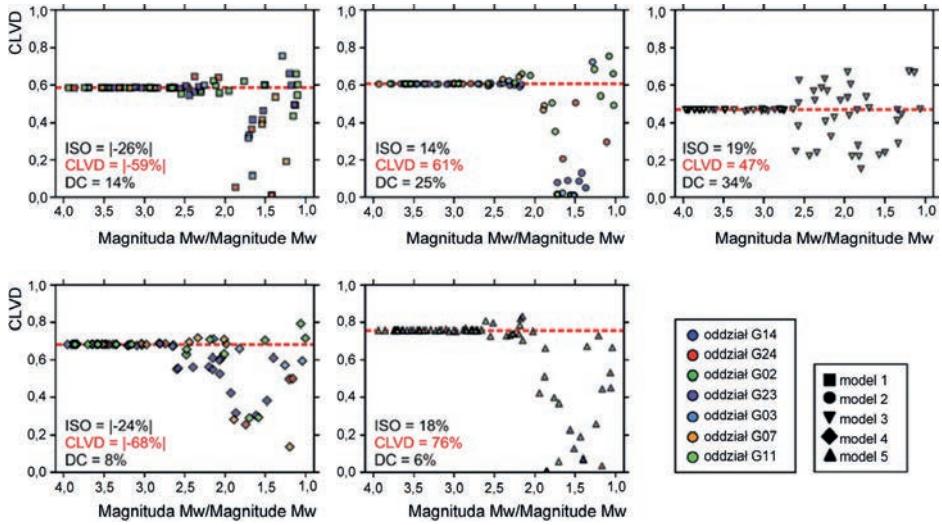
W celu dokładniejszego sprawdzenia każdego z uzyskanych rozwiązań przygotowano wykresy Hudsona (Hudson 1989) dla każdego z przyjętych modeli z grupy 2 (rys. 8). Na podstawie wykresów można zauważyć, iż rozwiązania w znacznej mierze prezentują mechanizm podobny do modelowego lub odwrotny, znajdujący się po przeciwnej stronie osi ISO i CLVD (widoczne przede wszystkim na rys 8a, c oraz d). Wynikać to może z problemu dokładnego dopasowania polaryzacji w drugim kroku inwersji, co jest pochodną słabszej jakości zapisów dla wstrząsów o mniejszych magnitudach. Ciekawą obserwacją jest fakt, iż reszta wyników jest w miarę równomiernie rozsiana wzdłuż osi CLVD. Występują co prawda rozwiązania silnie odstające od pozostałych (ang. *outlinery*) jednak są to pojedyncze wyniki dla każdego z rozpatrywanych modeli.

Niestety wykresy Hudsona bardzo dobrze prezentujące dekompozycje MT, nie pozwalają jednocześnie na analizę zależności między rezultatami inwersji, a siłą wstrząsu. W tym celu postanowiono przygotować dodatkowe diagramy prezentujące zależność procentowego udziału składowych CLVD (rys. 9) oraz ISO (rys. 10) od magnitudy. Na rysunku 9 widoczne jest, iż modele 1, 2 oraz 5 mają poprawną i stabilną wartość dekompozycji dla składowej CLVD, nawet przy magnitudzie 2.0. Pozostałe źródła prezentują niedoszacowanie liniowego dipola skompensowanego już przy wstrząsach $M \sim 2.5$, na co również wskazywały wyniki analizy błędu dopasowania (tys. 7b). Podobne zależności można zaobserwować na rysunku 10 gdzie zjawiska 1, 2, 4 oraz 5 prezentują stabilną dekompozycję dla części izotropowej rozwiązania wstrząsów o $M > 2.0$. W tym przypadku jednak ze względu na małe wartości składowej ISO wyniki dla słabszych zjawisk bywają zarówno niedoszacowane, jak i zawyżone.



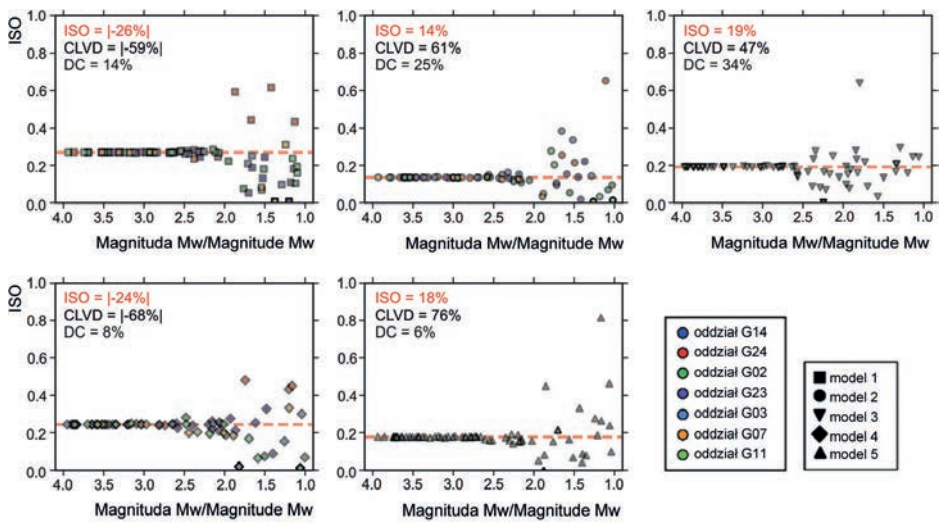
Rys. 8. Wykres Hudsona (Hudson 1989) dla poszczególnych modeli źródeł nieścinających oraz ich rozwiązania uzyskane dla różnych lokalizacji (oddziałów)

Fig. 8. Hudson's source type plot (Hudson 1989) of individual models of non-shear sources and their solutions obtained for various locations (mining panels)



Rys. 9. Udział liniowego dipola skompensowanego (CLVD)
w pełnym rozwiązaniu MT dla poszczególnych modeli źródeł nieścinających

Fig. 9. The share of CLVD in the full MT solution for individual models of non-shear sources



Rys. 10. Udział składowej izotropowej (ISO)
w pełnym rozwiązaniu dla poszczególnych modeli źródeł nieścinających

Fig. 10. The share of ISO in the full MT solution for individual models of non-shear sources

Wnioski

Jakość wyznaczenia mechanizmów ogniskowych uzależniona jest od kilku kluczowych czynników. Wśród nich do najważniejszych należy zaliczyć pokrycie azymutalne sieci oraz jakość zapisu manifestującą się stosunkiem szumu do amplitudy energii pochodzącej z zarejestrowanej fali sejsmicznej. Zaprezentowane badania syntetyczne dla warunków sieci dołowej dowodzą, że metody wyznaczania mechanizmów oparte o inwersje pełnego pola falowego są stabilne i nieczułe na pokrycie azymutalne sieci. Otrzymane w prezentowanym badaniu wyniki są porównywalne dla wszystkich przyjętych lokalizacji, zarówno tych w środku sieci pomiarowej, jak i dla granicznych oddziałów kopalni. Jedynym obserwowanym przez nas elementem warunkującym jakość rozwiązania jest magnituda wstrząsu. Analiza wyników wskazuje, że stabilny i prawidłowo wyznaczony mechanizm będzie można otrzymać przy pomocy inwersji pełnego pola falowego dla zjawisk o magnitudzie M powyżej 2.0, bez względu na jego lokalizację w granicach kopalni. Wyznaczanie mechanizmów wstrząsów o mniejszej sile może być jednak obarczone błędem. Z przeprowadzonego badania wynika więc, że inwersja pełnego pola falowego daje stabilne rozwiązania dla wstrząsów od $M > 2.0$ w obrębie granic kopalni. Najważniejszym wnioskiem płynącym z prezentowanych wyników jest fakt, że metoda ta jest przydatna w przypadku zjawisk występujących w oddziałach zlokalizowanych na skraju sieci, dla których otrzymanie stabilnego rozwiązania na podstawie standardowej inwersji pierwszych wstąpień fali P, może być problematyczne z uwagi na słabe pokrycie azymutalne sieci.

Podziękowania

Pragniemy podziękować dr Simone Cesca za pomoc oraz cenne wskazówki i uwagi dotyczące oprogramowania Kiwi tools i metodyki naszych badań. Praca powstała w wyniku realizacji projektu badawczego o nr 2017/25/N/ST10/01759 finansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki w ramach konkursu PRELUDIUM 13.

Literatura

Aki K., Richards P.G., 2002, Quantitative seismology, University Science Book, 700 s.

Caputa A., Rudziński Ł., 2019, Source analysis of post-blasting events recorded in deep copper mine, Poland, Pure and Applied Geophysics, 176 (8), 3451-3466, DOI: 10.1007/s00024-019-02171-x

Caputa A., Talaga A., Rudziński Ł., 2015, Analysis of post-blasting source mechanisms of mining-induced seismic events in Rudna copper mine, Poland, Contemporary Trends in Geoscience, 4 (1), 26-38, DOI: 10.1515/ctg-2015-0003

Cesca S., Buforn E., Dahm T., 2006, Amplitude spectra moment tensor inversion of shallow earthquakes in Spain, Geophysical Journal International, 166 (2) 839-854, DOI: 10.1111/j.1365-246X.2006.03073.x

Cesca S., Grigoli F., 2015, Full waveform seismological advances for microseismic monitoring, Advances in Geophysics, 56, 169-228, DOI: 10.1016/bs.agph.2014.12.002

Cesca S., Heimann S., 2013, A practical on moment tensor inversion using the Kiwi tools, [w:] New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2), P. Bormann (red.), Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam, DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP-2_EX_3.6

Cesca S., Heimann S., Stammler K., Dahm T., 2010, Automated procedure for point and kinematic source inversion at regional distances, Journal of Geophysical Research, 115, DOI: 10.1029/2009JB006450

Cesca S., Rohr A., Dahm T., 2013, Discrimination of induced seismicity by full moment tensor inversion and decomposition, Journal of Seismology, 17 (1), 147-163, DOI: 10.1007/s10950-012-9305-8

Dubiński J., 2013, The mechanisms and consequences of strong mining tremors that occur in Polish hard coal and copper mines, [w:] Rock Mechanics for Resources, Energy and Environment, EUROCK2013, W. Kwaśniewski, D. Łydżba (red.), Taylor & Francis Group, 31-38

Gibowicz S.J., Kijko A., 1994, An introduction to mining seismology, Academic Press, San Diego, 399 s.

Hasegawa H.S., Wetmiller R.J., Gendzwill D.J., 1989, Induced seismicity in mines in Canada – an overview, Pure and Applied Geophysics, 129 (3-4), 423-453, DOI: 10.1007/BF00874518

Heimann S., 2011, A robust method to estimate kinematic earthquake source parameters, Universitat Hamburg, dostępne online: https://ediss.sub.uni-hamburg.de/volltexte/2011/5357/pdf/Dissertation.pdf (18.09.2020)

Heimann S., Kriegerowski M., Isken M., Cesca S., Daout S., Grigoli F., Juretzek C., Megies T., Nooshiri N., Steinberg A., Sudhaus H., Vasyura-Bathke H., Willey T., Dahm T., 2017, Pyrocko – an open-source seismology toolbox and library, V. 0.3., GFZ Data Services, DOI: 10.5880/GFZ.2.1.2017.001

Hudson J.A., Pearce R.G., Rogers R.M., 1989, Source time plot for inversion of the moment tensor, Journal of Geophysical Research, 94 (B1), 765-774, DOI: 10.1029/JB094iB01p00765

Hudyma M.R., Brummer R.K., 2007, Seismic monitoring in mines – design, operation, tricks and traps, [w:] 1st Canada – U.S. Rock Mechanics Symposium, conference paper, American Rock Mechanics Association

Jost M.L., Herrmann R.B., 1989, A studen's guide to and review of moment tensors, Seismological Research Letters, 60 (2), 37-57, DOI: 10.1785/gssrl.60.2.37

Kagan Y.Y., 2005, Double-couple earthquake focal mechanism: random rotation and display, Geophysical Journal International, 163 (3), 1065-1072, DOI: 10.1111/j.1365-246X.2005.02781.x

Kagan Y.Y., 2007, Simplified algorithms for calculating double-couple rotation, Geophysical Journal International, 171 (1), 411-418, DOI: 10.1111/j.1365-246X.2007.03538.x

Koziarz E., Szłapka M., 2010, Kierunki dalszego rozwoju informatycznego systemu do bezpośredniej lokalizacji zjawisk dynamicznych w O/ZG „Rudna" KGHM „Polska Miedź" SA, Wiadomości Górnicze, 61 (3), 159-174

Kozłowska M., Orlecka-Sikora B., 2017, Assessment of quantitative aftershock productivity potential in mining-induced seismicity, Pure and Applied Geophysics, 174, 925-936, DOI: 10.1007/s00024-016-1432-7

Kwiatek G., Martínez-Garzón P., Bohnhoff M., 2016, HybridMT: A MATLAB/Shell environment package for seismic moment tensor inversion and refinement, Seismological Research Letters, 87 (4), 964-976, DOI: 10.1785/0220150251

Leake M.R., Conrad W.J., Westman E.C., Ghaychi Afrouz S., Molka R.J., 2017, Microseismic monitoring and analysis of induced seismicity source mechanisms in a retreating room and pillar coal mine in the Eastern United States, Underground Space, 2 (2), 115-124, DOI: 10.1016/j.undsp.2017.05.002

Lizurek G., Rudziński Ł., Plesiewicz B., 2015, Mining induced seismic event on an inactive fault, Acta Geophysica, 63 (1), 176-200, DOI: 10.2478/s11600-014-0249-y

Lizurek G., Wiejacz P., 2011, Geophysics in mining and environmental protection: moment tensor solution and physical parameters of selected recent seismic events at Rudna copper mine, [w:] Geophysics in mining and environmental protection. GeoPlanet: Earth and planetary sciences, 2, A.F. Idziak, R. Dubiel (red.), 11-19, DOI: 10.1007/978-3-642-19097-1_2

Ma J., Dineva S., Cesca S., Heimann S., 2018, Moment tensor inversion with three-dimensional sensor configuration of mining induced seismicity (Kiruna mine, Sweden), Geophysical Journal International, 213 (3), 2147-2160, DOI: 10.1093/gji/ggy115

Malovichko D., van Aswegen G., 2013, Testing of the source processes of mine related seismic events, [w:] Proceedings of the 8th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines, (September), 93-106

Mendecki A.J., van Aswegen G., Mountfort P., 1999, A guide to routine seismic monitoring in mines, [w:] A handbook on rock engineering practice for tabular hard rock mines, A.J. Jager, J.A. Ryder (red.), Creda Communications, Cape Town

Potvin Y., Hudyma M.R., 2001, Seismic monitoring in highly mechanized hardrock mines in Canada and Australia, [w:] Proceedings of the Fifth International Symposium of Rockburst and Seismicity in Mines, South African Insitute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, 267-280

Rudziński Ł., 2013, Rozwiązanie mechanizmu zjawiska sejsmicznego poprzez inwersję sejsmogramów, Przegląd Górniczy, 5 (69), 49-55

Rudzinski L., Cesca S., 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, 87 (2A), 274-284, DOI: 10.1785/0220150150

Rudziński Ł., Dębski W., 2011, Extending the double-difference location technique to mining applications part I: Numerical study, Acta Geophysica, 59 (4), 785-814, DOI: 10.2478/s11600-011-0021-5

Rudziński L., Mirek J., Lizurek G., 2017, Identification of seismic doublets occurred on Rudna mine, Poland, Acta Geophysica, 65 (2), 287-298, DOI: 10.1007/s11600-017-0034-9

Sen A.T., Cesca S., Bischoff M., Meier T., Dahm T., 2013, Automated full moment tensor inversion of coal mining-induced seismicity, Geophysical Journal International, 195 (2), 1267-1281, DOI: 10.1093/gji/ggt300

Stec K., 2012, Focal mechanisms of mine-induced seismic events an explanation of geomechanical processes in the area of longwall 6, seam 510 in hard coal mine ,,Bobrek Centrum", Archives of Mining Sciences, 57 (4), 871-886, DOI: 10.2478/v10267-012-0057-7

Stec K., Wojtecki Ł., 2011, Charakterystyka mechanizmu ognisk wstrząsów górotworu związanych z eksploatacją pokładu 510 ścianą 502 w kopalni węgla kamiennego „Bielszowice", Prace Naukowe GIG. Górnictwo i środowisko, 1, 61-77

Talaga A., Koziarz E., Rudziński Ł., 2017, Skomplikowany mechanizm pękania górotworu w warunkach działania kopalni głębinowej na podstawie zjawiska sejsmicznego ZG „Rudna" w Polkowicach, Przegląd Górniczy, 73 (4), 34-40

Wang R., 1999, A Simple orthonormalization method for stable and efficient computation of green's functions, Bulletin of the Seismological Society of America, 89 (3), 733-741

Wojtecki Ł., Mendecki M.J., Zuberek W.M., Knopik M., 2016, An attempt to determine the seismic moment tensor of tremors induced by destress blasting in a coal seam, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 100, 162-169

S t r e s z c z e n i e

Sejsmiczność indukowana działalnością górniczą jest stale monitorowana i analizowana w celu zwiększenia bezpieczeństwa wydobycia kopalin. Jedną z procedur, chociaż niestosowanych rutynowo w polskim górnictwie węgla i miedzi, jest wyznaczanie mechanizmów ogniskowych silniejszych wstrząsów. Najprostszą i jak dotąd jedyną stosowaną metodą ich obliczania jest inwersja pierwszych wstąpień fali P w domenie czasu. Metoda ta pomimo swojej prostoty i możliwości bezpośredniej kontroli analizowanego wejścia fali sejsmicznej, jest procedurą bardzo czułą na geometrię sieci pomiarowej. Jest to szczególnie kłopotliwe w przypadku dołowych sieci kopalnianych, gdzie geometria sieci ograniczona jest istniejącą infrastrukturą podziemną. W niniejszym opracowaniu proponujemy i testujemy metodę inwersji pełnego pola falowego, przeprowadzaną w domenie częstotliwości oraz czasu, która do tej pory nie była powszechnie stosowana w polskim górnictwie. W oparciu o sejsmogramy syntetyczne obliczone dla lokalnego modelu prędkościowego oraz z wykorzystaniem geometrii rzeczywistej sieci monitoringu sejsmicznego, przeprowadziliśmy badanie przydatności inwersji pełnego pola falowego do obliczeń w warunkach górniczych. W pracy prezentujemy analizy 10 różnych modeli mechanizmów ogniskowych testowanych w różnych lokalizacjach kopalni dla zmiennej siły wstrząsu oraz z dodatkowym rzeczywistym szumem sejsmicznym. Na podstawie otrzymanych wyników możemy stwierdzić, iż głównym czynnikiem warunkującym jakość rozwiązania jest siła wstrząsu i wynikająca z niego zależność amplituda/szum. Natomiast metoda ta nie jest czuła na geometrię sieci pomiarowej.

Słowa kluczowe: sejsmiczność indukowana, mechanizmy ogniskowe wstrząsów, inwersja pełnego pola falowego, testy syntetyczne.

S u m m a r y

In order to improve the safety procedures of georesources exploitation, the induced seismicity is constantly monitored and examined. One of the procedures method, although even though not rou-

tinely used in Polish coal and copper mining mines, is the calculation of focal mechanisms of strong seismic events. The simplest and so far the only used method for source mechanisms estimation is the inversion of the first P wave onsets in the time domain. Despite its simplicity and the ability to direct control of analyzed seismic waves used during inversion, it is a procedure very sensitive to the geometry of the monitoring seismic network. This is particularly troublesome in the case of underground seismic monitoring system, where the geometry of the network is limited by the existing underground infrastructure. In this study, we propose and test the full waveform inversion method, performed both in the frequency and time domain. This kind of method has not been widely used in Polish miningmines. Basing on synthetic seismograms prepared for the local velocity model and using geometry of the real seismic monitoring network, we conducted a study of the suitability of the full waveform inversion for calculations in underground mining conditions. In this paper, we present analyzes of 10 different source models of focal mechanisms tested in various mine locations within mining area. The tests were performed for variable events strength and with additional real seismic noise. On the grounds of obtained results, we can conclude that the main factor determining the solution quality is the strength of mining tremor and amplitude/noise relationship resulting from it. However, this method is not sensitive to the geometry of the measurement network.

Keywords: induced seismicity, source mechanisms, full waveform inversion, synthetic tests.