

dr hab. inż. Adam Lurka, prof. Instytutu
Główny Instytut Górnictwa
Plac Gwarków 1
40-166 Katowice

Recenzja

Rozprawy doktorskiej mgr Alicji Caputy na temat: „**Analiza wpływu aktywnej profilaktyki tąpniowej na źródła wstrząsów indukowanych działalnością górniczą**”.

1. Podstawa recenzji

Niniejszą recenzję opracowałem na zlecenie Rady Naukowej Instytutu Geofizyki PAN, pismo z dnia 03-12-2025 – dostarczone wraz z rozprawą doktorską jak w tytule recenzji. Rozprawa ujęta jest na 165 stronach druku komputerowego formatu A4 wraz z opublikowanymi artykułami. Spis literatury obejmuje 225 pozycji.

2. Treść rozprawy

Rozprawa Anny Caputy poświęcona jest sejsmologii górniczej w warunkach eksploatacji podziemnej, a jej główny cel polega na ocenie wpływu aktywnej profilaktyki tąpniowej, realizowanej przez roboty strzałowe w kopalni miedzi ZG Rudna w LGOM, na charakter źródeł wstrząsów indukowanych działalnością górniczą. Doktorantka wychodzi od następującego problemu badawczego: w kopalnianych sieciach monitoringu sejsmicznego dokonuje się rutynowo obliczeń lokalizacji i energii sejsmicznej wstrząsów górniczych, natomiast znacznie mniej uwagi poświęca się temu, na ile takie sieci sejsmiczne umożliwiają wiarygodne wyznaczanie mechanizmów ognisk wstrząsów. W tym kontekście Doktorantka zadaje pytanie czy wstrząsy górnicze uznawane za sprowokowane strzelaniem różnią się od zjawisk samoistnych w sensie mechanizmu źródłowego oraz parametrów spektralnych.

W związku z powyższym, najpierw Doktorantka podejmuje w pracy ocenę możliwości i ograniczeń dołowej sieci sejsmicznej ZG Rudna pod kątem obliczeń inwersji tensora momentu sejsmicznego. Na tej podstawie przechodzi do części, w której analizuje wstrząsy rejestrowane po robotach strzałowych i porównuje ich właściwości z wstrząsami zachodzącymi bez bezpośredniego związku czasowego ze strzelaniami. Teza (hipoteza badawcza) brzmi następująco. Źródła wstrząsów górniczych sprowokowane przez detonacje MW w kopalni ZG Rudna powinny wykazywać odmienny charakter względem zjawisk

samoistnych z punktu widzenia inwersji tensora momentu oraz wybranych parametrów spektralnych.

W rozdziałach wprowadzających Doktorantka omawia warunki geologiczno-górnice obszaru LGOM oraz charakteryzuje warunki obserwacji sejsmiczności w kopalni ZG Rudna podkreślając przy tym znaczenie geometrii sieci sejsmologicznej jak i modelu opisującego propagację fal sejsmicznych w ośrodku skalnym. W tej części pracy zostaje wprowadzony także kontekst profilaktyki tąpniowej – organizacji robót strzałowych, sposobu prowadzenia strzelań oraz procedur bezpieczeństwa. Jest to o tyle istotne, gdyż w dalszej analizie kluczowym kryterium klasyfikacyjnym dla zjawisk sejsmicznych staje się czas ich wystąpienia względem detonacji MW i obowiązującego tzw. „czasu wyczekiwania”.

Następnie Doktorantka przedstawia rozdział poświęcony metodom obliczania mechanizmów ognisk wstrząsów sejsmicznych. Doktorantka opisuje tutaj mechanizm źródła wstrząsu jako punktowy tensor momentu sejsmicznego i przedstawia jego dekompozycję na składowe: izotropową (ISO), składową typu CLVD oraz składową podwójnej pary sił (DC). Ta dekompozycja jest szczególnie często spotykana w sejsmologii górniczej, gdzie w przeciwieństwie do trzęsień Ziemi udział procesów nieścinających bywa znaczący i może wykazywać składowe inne niż ścinające: rozciągające, ściskające, eksplozyjne lub implozyjne. W tej części pracy przedstawiono również metody inwersji tensora momentu sejsmicznego, w tym inwersji z wykorzystaniem pełnego pola falowego.

Z metodycznego punktu widzenia Doktorantka przed interpretacją danych rzeczywistych, wykonuje walidację metod inwersji tensora na danych syntetycznych. Opisujący to rozdział ma charakter eksperymentu numerycznego, zbudowanego na geometrii rzeczywistej sieci sejsmicznej zainstalowanej w ZG Rudna. Jako katalog danych syntetycznych Doktorantka uwzględnia zarówno mechanizmy czysto ścinające (DC), jak i źródła z udziałem składowych nieścinających (ISO i CLVD), których proporcje są zmieniane. Dodatkowo stara się też zamodelować realistyczne warunki rejestracji, dodając do sejsmogramów syntetycznych szum o amplitudach zgodnych z rejestracjami kopalnianymi.

W testach syntetycznych porównano dwa podejścia do wyznaczania mechanizmu ogniskowego. Pierwszym jest inwersja pełnego pola falowego, realizowana w środowisku KIWI Tools w schemacie dwuetapowym, obejmującym dopasowanie w domenie częstotliwości oraz w domenie czasu. Drugim podejściem jest inwersja oparta o pierwsze wstąpienia fali P, która jest dość powszechnie stosowana w sejsmologii górniczej. Wyniki testów syntetycznych są w pracy przedstawione w postaci „fuzzy beachballs”, histogramów i rozkładów błędów dopasowania. Doktorantka kwantyfikuje jakość dopasowania danych do modelu przez rozkłady wartości dopasowania wartości Misfit i błąd średniokwadratowy RMS jak również w postaci tzw. kąta Kagana. Dodatkowo przeprowadza testy wrażliwości na błąd modelu prędkościowego, modyfikując miąższości warstw i wartości prędkości tego modelu.

W części syntetycznej Doktorantka pokazuje, że przy małych magnitudach i lokalizacjach ognisk wstrząsów na granicach sieci sejsmologicznej wyniki są obarczone większą

niepewnością, natomiast dla zdarzeń silniejszych inwersja pełnego pola falowego okazuje się stabilniejsza niż metoda oparta o pierwsze wstąpienia fali P.

Część empiryczna rozprawy obejmuje analizę sejsmiczności z rejonu pola G-11/8 w kopalni ZG Rudna w latach 2011–2014. Doktorantka podzieliła analizowane wstrząsy na trzy grupy: wstrząsy występujące bezpośrednio po strzelaniu (grupa Ia), wstrząsy pojawiające się w dłuższym czasie po detonacji (grupa Ib) oraz zdarzenia samoistne (grupa II). Taki podział jest uzasadniony praktyką prowadzenia strzelań MW na kopalni i związanym z tym tzw. czasem wyczekiwania.

Analiza mechanizmów ogniskowych dla danych rzeczywistych prowadzona jest przede wszystkim metodą inwersji pełnego pola falowego, co wynika z testów syntetycznych. Wyniki dla trzech wspomnianych grup zdarzeń sejsmicznych są przedstawione jako rozkłady udziałów składowych izotropowej (ISO), składowej typu CLVD oraz składowej podwójnej pary sił (DC) posługując się tzw. wykresem Hudsona. Ostatecznie Doktorantka stosuje nieparametryczny test U Manna–Whitney’a sprawdzając czy różnice pomiędzy trzema analizowanymi grupami wstrząsów są statystycznie istotne.

Obraz, który wyłania się z części empirycznej jest następujący. Wstrząsy bezpośrednio po detonacji (grupa Ia) wykazują bardziej jednorodny charakter mechanizmu źródłowego oraz relatywnie podwyższony, dodatni udział składowych nieścinających, co Doktorantka interpretuje jako wpływ oddziaływania strzelań MW. Z kolei wstrząsy z grupy Ib pozostają w pewnej relacji do strzelania MW, lecz ich mechanizmy są bardziej rozproszone na wykresie Hudsona. Największą zmienność mechanizmów obserwuje się w grupie trzeciej, co może sugerować, że na sejsmiczność indukowaną w kopalni wpływa lokalny stan naprężeń, geometria eksploatacji i aktywacja istniejących nieciągłości w górotworze.

W uzupełniającym rozdziale w stosunku do rozdziału zawierającego analizę inwersji tensora momentu sejsmicznego przeprowadzona jest analiza spektralna w oparciu o widma sejsmogramów prędkościowych. Doktorantka oblicza parametry źródła sejsmicznego, takie jak moment sejsmiczny, promień źródła, spadek naprężeń, naprężenie pozorne oraz dodatkowo stosunek energii spektralnej dla fal S i P. Szczególne znaczenie ma tu interpretacja naprężenia pozornego oraz stosunku energii spektralnej ES/EP. Doktorantka sugeruje, że podwyższone wartości naprężenia pozornego dla zdarzeń prowokowanych można wiązać z pękaniem górotworu nienaruszonego eksploatacją, podczas gdy niższe naprężenie pozorne w może świadczyć o częstszej aktywacji już istniejących nieciągłości. Natomiast stosunek energii spektralnej ES/EP jest mniejszy dla grupy wstrząsów występujących bezpośrednio po strzelaniu MW.

W podsumowaniu Doktorantka formułuje wnioski wskazując, że wiarygodność rozwiązań mechanizmów ogniskowych zależy silnie od jakości danych i geometrii sieci, stwierdzając, że inwersja tensora momentu sejsmicznego z użyciem pełnego pola falowego stanowi obiecujące narzędzie w warunkach sieci kopalnianej. Dodatkowo podkreśla, że

wstrząsy górnicze powiązane czasowo z detonacją MW wykazują różnice w obliczonych wartościach tensora momentu sejsmicznego.

3. Merytoryczna opinia rozprawy

3.1. Ocena wyboru tematu rozprawy

Wybór tematu rozprawy można ocenić jako bardzo trafny, ponieważ dotyczy problemu, który w seismologii górniczej jest jednocześnie istotny poznawczo i ważny praktycznie. Doktorantka zajmuje się relacją pomiędzy aktywną profilaktyką tąpaniową opartą na robotach strzałowych w kopalni miedzi KGHM Rudna a charakterystyką źródeł wstrząsów indukowanych w górotworze. Jest to zagadnienie o bezpośrednim znaczeniu dla bezpieczeństwa eksploatacji w kopalniach z występującą sejsmicznością indukowaną. Na szczególne podkreślenie zasługuje to, że praca stawia naukowo ważne pytanie, a mianowicie czy wstrząsy powiązane czasowo ze strzelaniami różnią się od sejsmiczności indukowanej na kopalni w sensie mechanizmu ogniskowego i parametrów źródłowych. Doktorantka wskazuje na istniejącą lukę poznawczą, podkreślając niedostatek jednoznacznych dowodów na sposób powiązania zdarzeń sejsmicznych po strzelaniach z profilaktyką tąpaniową.

Temat rozprawy ma jasny komponent nowości metodycznej, ponieważ zakłada zastosowanie i walidację inwersji tensora momentu sejsmicznego dla pełnego pola falowego w wariacie dwuetapowym. Dzięki temu temat pracy staje się konstrukcyjnie dobrze dobrany, gdyż opiera się na rzeczywistym materiale obserwacyjnym pochodzącym z systemu monitoringu sejsmicznego w kopalni miedzi. Temat rozprawy podjęty przez Doktorantkę wymagał zarówno szerokiego zakresu wiedzy, jak też determinacji jej poszerzenia poza zakres określony kierunkiem studiów i dużego nakładu pracy.

3.2. Sposób realizacji pracy

Doktorantka stawia w rozprawie pytanie: czy roboty strzałowe zmieniają sposób, w jaki górotwór uwalnia energię, a więc czy da się uchwycić rozpoznawalną różnicę w charakterze źródła sejsmicznego wstrząsów powiązanych ze strzelaniami w porównaniu do sejsmiczności samoistnej.

Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że praca została zrealizowana w sposób metodycznie dojrzały. W warunkach kopalnianych interpretacja mechanizmów ogniskowych bywa obciążona wieloma ograniczeniami: geometrią rozmieszczenia stanowisk sieci sejsmicznej, wysokim poziomem szumu oraz problemami z poprawnością modelu prędkościowego ośrodka.

Wkład metodyczny jest tu jednym z najmocniejszych argumentów przemawiających za wysoką oceną pracy. Doktorantka nie ogranicza się do standardowych, rutynowych procedur

typowych dla monitoringu kopalnianego, lecz konsekwentnie weryfikuje i wdraża podejście bardziej wymagające: inwersję pełnego pola falowego dla tensora momentu sejsmicznego, zestawiając ją z podejściem opartym o pierwsze wstąpienia fali P. Kluczowe jest jednak nie samo użycie bardziej zaawansowanej metody, lecz sposób, w jaki Doktorantka uzasadnia jej dobór i granice stosowalności. Testy syntetyczne oparte o rzeczywistą geometrię sieci sejsmicznej, obejmujące źródła zarówno ścinające, jak i z udziałem składowych nieścinających tworzą fundament do późniejszej interpretacji.

Hipoteza o odmienności źródeł wstrząsów prowokowanych detonacją MW jest testowana poprzez konkretne miary, takie jak: udziały składowych nieścinających w dekompozycji tensora momentu sejsmicznego, rozmieszczenie na wykresie Hudsona oraz weryfikację statystyczną różnic pomiędzy grupami.

Od strony aplikacyjnej rozprawa charakteryzuje się tym, że materiał empiryczny pochodzi z kopalni dysponującej rozbudowanym sejsmicznym monitoringiem podziemnym, co daje szansę na przeprowadzenie analizy o odpowiedniej jakości.

Warto podkreślić, że praca została zrealizowana tak, aby łączyć dwa komplementarne spojrzenia na źródło sejsmiczne. Analiza mechanizmu ogniskowego daje informację o charakterze procesu w ognisku, natomiast analiza spektralna parametrów źródłowych pozwala interpretować wyniki w kategoriach spadku naprężeń, naprężenia pozornego czy stosunku energii fal S do P.

Oczywiście rozprawa, z racji swojego zakresu, niesie też naturalne ograniczenia. Wyniki empiryczne odnoszą się do konkretnego rejonu i kopalni, a więc ich pełna ogólność powinna być formułowana bardzo ostrożnie.

3.3. Uwagi krytyczne i pytania.

Recenzowana praca doktorska zawiera elementy, które stanowią oryginalny i własny wkład Doktorantki. Niemniej jednak zawiera również pewne niedociągnięcia przedstawione poniżej w postaci uwag i pytań.

- Na stronie 13 podano, że „...dołowa sieć monitoringu ZG Rudna pozwala na lokalizację zjawisk sejsmicznych z dokładnością horyzontalną ok. 100m oraz wertykalną do 300 m”. Czy można coś więcej powiedzieć na ten temat tzn. jak podana dokładność lokalizacji wpływa na obliczenia tensora momentu sejsmicznego, gdyż Doktorantka w pracy nie analizowała tego problemu bezpośrednio?

- Na stronie 27 podano, że „Ostatecznie w celu wyznaczenia tensora momentu sejsmicznego konieczne jest rozwiązanie układu N równań (21), gdzie N jest liczbą stacji na których dokonano rejestracji (Shearer, 2009). Układ równań rozwiązywany jest w tym przypadku za pomocą normy L2 (metody najmniejszych kwadratów), która przez Fitch i in.

(1980) jest definiowana jako...”. To nie układ równań jest rozwiązywany, ale stosowana jest metoda najmniejszych kwadratów, której wynik nie jest rozwiązaniem układu równań, proszę o komentarz.

- Na stronach 31 i 35 opisy wzorów (22) i (25) są niepełne i przez to niejasne. Podano, że d_j to dane, ale jakie konkretnie są to dane? Czym są konkretnie parametry M_k ? Jakie są zakresy indeksów j oraz k ? Proszę o komentarz.

- Na stronie 27 podano, że „Błędy wyznaczonego w procesie inwersji rozwiązania prezentowane są pod postacią znormalizowanego błędu średniokwadratowego (ang. RMS Error). Wartość ta opisuje błąd dopasowania amplitud obserwowanych na zapisach sejsmicznych do amplitud teoretycznych wyznaczonych podczas inwersji.” W takim razie RMS nie opisuje błędów rozwiązania a tylko błędy dopasowania danych do modelu, proszę o komentarz.

- Na stronie 38 podano, że „Wartość składowej nieścinającej w obu przypadkach zawiera się w granicach od 10 do 100% pełnego MT i była zmieniana co 10 pkt. procentowych (p.p.)” Czym różnią się punkty procentowe od zwykłych procentów i czy jest sens mówić o punktach procentowych?

- Na stronach 40 i 41 na rys. 16 i 17 nie podano jednostek na osiach pionowych i/lub poziomych.

- Na stronie 82 podane, że „Dopasowanie sejsmogramów rzeczywistych do syntetycznych przeprowadzone zostało w oparciu o rejestracje przefiltrowane filtrem pasmowym 2.0 - 5.0 Hz, którego pasmo odpowiada zakresowi płaskiej charakterystyki częstotliwościowej rejestratorów w sieci dołowej ZG Rudna.” Czy to oznacza, że zakres rejestrowanych częstotliwości wynosił 3Hz? To jest niemożliwe, proszę o komentarz.

- Na stronie 99 na rys. 49B mamy pokazaną analizę parametrów spektralnych w paśmie 1-200 Hz lub nawet większym, czyli pasmo częstotliwości jest zupełnie inne niż w analizie inwersji tensora momentu sejsmicznego, dlaczego?

- Na stronie 162 w tabeli Z.2.1 pokazano wyniki obliczeń parametrów spektralnych. Jeżeli w grupie Ia dominowały mechanizmy niepoślizgowe to dlaczego promień ogniska wynosi dla tych zjawisk sejsmicznych od kilkudziesięciu do nawet 300 metrów? Powstaje też ogólniejsze pytanie czy jest sens obliczania parametrów spektralnych dla mechanizmów nieścinających?

- Na stronie 119 podano, że „Postawiona we wstępie hipoteza badawcza, jakoby źródła wstrząsów uznawane za prowokowane detonacją ładunków wybuchowych różniły się od zjawisk występujących samoistnie, w ocenie autorki niniejszej pracy może zostać uznana za prawdziwą”. Otóż, zgodnie z słownikiem języka polskiego spójnik „jakoby” wyraża wątpliwość we własne słowa i pojawia się w pracy w kilku miejscach. Prawdopodobnie jest to lapsus językowy.

Wymienione uwagi i pytania nie pomniejszają niezaprzeczalnego i istotnego wkładu własnego Doktorantki i służą jedynie do wskazania możliwości dalszych badań lub wprowadzenia drobnych korekt w ewentualnych publikacjach wyników tej pracy.

3.4. Ogólna ocena dysertacji

Przedstawiona mi do recenzji rozprawa jest dobrze przemyślana i jasno przedstawiona. Doktorantka nie ogranicza się jedynie do opisanie źródeł zjawisk sejsmicznych po strzelaniach, lecz porządkuje cały problem w sposób metodyczny. Widać wyraźnie, że kluczowym celem nie jest jedynie stwierdzenie, czy po detonacjach wstrząsy mają inny charakter, ale odpowiedź na pytanie, czy zmienia się charakter źródła sejsmicznego tych zjawisk, a więc czy aktywna profilaktyka tąpaniowa pozostawia rozpoznawalny ślad w mechanizmach ogniskowych i parametrach źródłowych. Taki sposób postawienia problemu nadaje pracy wyraźną wartość poznawczą i jednocześnie utrzymuje jej związek z praktyką górniczą.

Na szczególnie wysoką ocenę zasługuje warstwa metodyczna. Doktorantka zaczyna od sprawdzenia, na ile dołowa sieć sejsmiczna faktycznie pozwala na wiarygodne wyznaczenie mechanizmów ogniskowych i tensora momentu sejsmicznego, czyli rozstrzyga, jak określać potencjalne błędy interpretacji, by nie mylić efektów fizycznych ze skutkami ograniczeń pomiaru. Rozwiązania oparte na inwersji pełnego pola falowego są w pracy sprawdzane na drodze testów syntetycznych, a dopiero potem przenoszone na dane rzeczywiste. To podejście wzmacnia wiarygodność całej części empirycznej, ponieważ wynik jest konsekwencją wcześniejszego rozpoznania błędów, wrażliwości na model ośrodka, szum i geometrię sieci.

Część empiryczna pracy jest przeprowadzona w sposób metodyczny i łatwy do analizy. Doktorantka kontroluje jakość danych i jakości otrzymywanych rozwiązań, sygnalizując typowe problemy występujące podczas rejestracji zjawisk sejsmicznych przez sieci kopalniane, jak np. przesterowanie amplitud cyfrowych sejsmogramów wstrząsów. Istotnym walorem pracy jest też to, że interpretacja mechanizmów ogniskowych została uzupełniona analizą spektralną parametrów źródłowych, co nadaje wnioskowi szerszy wymiar fizyczny. Nie mniej naturalnym ograniczeniem pracy pozostaje fakt, że część empiryczna dotyczy konkretnego rejonu.

Doktorantka prezentuje w rozprawie ogólną wiedzę teoretyczną w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie „Nauki o Ziemi i Środowisku”, poprzez umiejętność interpretacji skomplikowanych wyników i świadczy o umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

4. Wnioski

Przeprowadzona analiza rozprawy doktorskiej mgr Alicji Caputy pozwala na stwierdzenie, że Doktorantka twórczo zastosowała swoje oryginalne rozwiązanie polegające na wykorzystaniu dwuetapowej inwersji tensora momentu sejsmicznego dla wstrząsów indukowanych działalnością górniczą do wykazania związku między występowaniem wstrząsów górniczych bezpośrednio po strzelaniu a ich mechanizmem na rzeczywistym poligonie pomiarowym w kopalni ZG Rudna w KGHM.

Uzyskane rezultaty badań pogłębiają naszą wiedzę na temat mechanizmów powstawania zjawisk dynamicznych indukowanych eksploatacją górniczą oraz tworzą podstawy do bardziej rzetelnej oceny i prognozowania poziomu zagrożenia sejsmicznego i tąpniętami w kopalniach. Warto zaznaczyć, że problematyka ta należy do wyjątkowo złożonych, jednak jej praktyczne znaczenie jest niepodważalne zarówno w skali krajowej jak i międzynarodowej.

Pragnę na koniec zaznaczyć, że krytyczne uwagi zawarte w recenzji nie wpływają na moją wysoką ocenę przedłożonej mi do recenzji dysertacji.

Na podstawie przedstawionej mi do recenzji rozprawy doktorskiej mgr Alicji Caputy pt.: „Analiza wpływu aktywnej profilaktyki tąpniowej na źródła wstrząsów indukowanych działalnością górniczą”, stwierdzam, że spełnia ona wymagania ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku, Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz. U. 2018, poz. 1668, z późn. zm. W związku z tym wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Adam Łuka