

Katowice, 29.07.2025r.

Prof. dr hab. inż. Grzegorz Mutke
Zakład Geologii, Geofizyki i Ochrony Powierzchni
Główny Instytut Górnictwa Państwowy Instytut Badawczy
Katowice, Plac Gwarków 1

Recenzja

Rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Natalii Bugajskiej-Jędraszek
pod tytułem: *Integracja metod satelitarnej interferometrii radarowej
z geofizycznym opisem zjawiska wstrząsów indukowanych*

Rozprawa doktorska procedowana na Politechnice Wrocławskiej w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych oraz w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

Promotorzy rozprawy:

dr hab. inż. Wojciech Milczarek, prof. uczelni

dr hab. Grzegorz Lizurek, prof. Instytutu

Informacje wstępne

Podstawą wykonania recenzji była uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka z dnia 14.05.2025 roku oraz zawiadomienie Prorektora Pana prof. dr hab. inż. Dariusza Łydzby, z dnia 16.05.2025r. o znaku nr. 25/05/D08/2025.

Przewód doktorski prowadzony jest na podstawie Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tj. Dz.U. z 2024 r. poz. 1571). Zgodnie z warunkami określonymi w Ustawie rozprawa doktorska powinna być oryginalnym rozwiązaniem przez doktoranta określonego problemu naukowego, wykazywać jego ogólną wiedzę teoretyczną w danej dyscyplinie naukowej oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Przede wszystkim do tych trzech wymagań ustawowych odniosłem się w ocenie przedmiotowej rozprawy doktorskiej.

Struktura rozprawy doktorskiej i metodyka badań

Niniejsza rozprawa liczy 204 strony, w tym spis treści i wykaz symboli, streszczenie w języku polskim i angielskim, siedem głównych rozdziałów, bibliografię (283 pozycje literatury), spis rysunków (91) i tabel (26) oraz dodatek A (wykaz

indukowanych wstrząsów sejsmicznych z bazy danych HiQuake), dodatek B (wykaz pozyskanych zobrażeń satelitarnych wraz z wynikami interpretacji danych) i dodatek C (premieszczenia obserwowane, modelowane, rezydualne oraz parametry płaszczyzny uskokowej dla analizowanych indukowanych zjawisk sejsmicznych).

Najważniejsze zagadnienia przedstawione w poszczególnych rozdziałach pracy:

- R. 1 - w którym doktorantka przedstawiła problem badawczy, cel i tezę pracy oraz koncepcję realizacji badań,
- R.2 , R3, R4 i R5 - to opisane podstawy teoretyczne, charakterystyka obszarów badawczych oraz metodyka badań,
- R.6 - prezentujący wyniki badań i analizy z poligonów badawczych dla wybranych indukowanych zjawisk sejsmicznych oraz dyskusja wyników uwzględniająca uzasadnienie wyboru oraz realizację celów i tezy dysertacji.
- R.7 - podsumowanie z wnioskami końcowymi i kierunkami dalszych badań.

Główny cel badawczy rozprawy to *„integracja informacji o przemieszczeniach pozyskanych z wykorzystaniem metod satelitarnej interferometrii radarowej do wykrywania wpływów wstrząsów indukowanych na powierzchnię terenu oraz wnioskowania o mechanizmie ich powstawania w zależności od wielkości zjawiska oraz prowadzonej działalności górniczej”*, natomiast postawiona teza rozprawy doktorskiej zakłada, że *rezultaty przeprowadzonych badań dostarczą danych jakościowych i ilościowych w zakresie oceny wpływów sejsmiczności indukowanej na powierzchnię terenu w rejonach aktywności górniczej z wykorzystaniem metod satelitarnej interferometrii radarowej*.

Sam tytuł pracy oraz cel badawczy wyznaczają bardzo ambitne zadania naukowe, które wymagają opracowania odpowiedniej metodyki badań z zakresu przetwarzania danych SAR w obszarze relatywnie niewielkich przemieszczeń oraz inwersji źródła sejsmicznego indukowanych zjawisk sejsmicznych, z wykorzystaniem opracowanych metodą InSAR krótkookresowych przemieszczeń skorygowanych o wpływ efektów troposferycznych.

Do przetwarzania danych SAR doktorantka opracowała metodykę obliczeń trzema technikami interferometrycznymi, przedstawioną schematycznie na rys. 5.1 rozprawy i zaimplementowaną do wszystkich obszarów badawczych:

- przemieszczenia krótkookresowe – metoda DinSAR – 2 zobrażenia bezpośrednio przed i po wstrząsie,
- przemieszczenia długookresowe – metoda SBAS – min. 15 zobrażeń (akwizycja dla okresu 8 miesięcy),

- deformacje nieciągłe – metoda gradientu fazy – 2 zobrażenia bezpośrednio przed wstrząsem i akwizycja dla okresu miesiąc po wstrząsie.

W dalszym etapie przetwarzania danych według opracowanej metodyki, doktorantka przedstawiła schemat ciągu obliczeniowego wyznaczania przemieszczeń krótkookresowych z wykorzystaniem interferometrii różnicowej (rys. 5.2 rozprawy), schemat procesu wyznaczania przemieszczeń długookresowych z wykorzystaniem metody krótkich baz SBAS (rys. 5.6 rozprawy) oraz schemat procesu wyznaczania deformacji nieciągłych z wykorzystaniem gradientu fazy.

Do badania mechanizmów i opisów źródła indukowanych zjawisk sejsmicznych doktorantka wybrała metodę opartą o krótkookresowe przemieszczenia z zobrażeń InSAR i dekompozycję LOS na składową pionową i poziomą E-W oraz geometrię źródła sejsmicznego wg. prostokątnego modelu Okady, który umożliwia oszacowanie parametrów geometrycznych i kinematycznych źródła. Schemat procesu inwersji źródła sejsmicznego doktorantka przedstawiła na rys. 5.10 rozprawy. Parametry płaszczyzny uskokowej zostały obliczone dla modelu półprzestrzeni sprężystej jednorodnej oraz dla modelu warstwowego. Inwersję przeprowadziła z uwzględnieniem podejścia probabilistycznego, co umożliwiło uzyskanie wyników w postaci gęstości prawdopodobieństwa. Iteracyjny proces poszukiwania przestrzeni parametrów oraz optymalizacji, pozwala na znalezienie najlepszego rozwiązania. W dysertacji przeprowadzono obliczenia w oparciu o tradycyjną metodę próbkowania i wykorzystując oprogramowanie GBIS oraz metodę BOBO, łączącą elementy wnioskowania bayerowskiego oraz bootstrappingu, wykorzystując do obliczeń oprogramowanie GROND. Zastosowany algorytm obliczeniowy dobrze sprawdza się przy analizie danych SAR. Zaproponowana metodyka stanowi kompleksowe podejście do badania silnych zjawisk sejsmicznych indukowanych działalnością górniczą, z wykorzystaniem danych pomiarowych interferometrycznych oraz geofizycznych (tutaj przede wszystkim wielkość magnitudy zjawiska i zawartość składowej DC w mechanizmie źródła sejsmicznego). Jednak w realiach indukowanych wstrząsów sejsmicznych ma swoje duże ograniczenia związane z wielkością zjawiska. Wstrząsy sejsmiczne o magnitudach $M_w < 4.0$ praktycznie nie uda się interpretować zaproponowaną metodyką, ze względu na brak lub znikome efekty przemieszczeń powierzchni po tak słabych wstrząsach. Niemniej do analizy silniejszych wstrząsów indukowanych, opracowana metodyka daje bardzo dobre wyniki i pozwala między innymi na rozstrzygnięcie niejednoznaczności rozwiązań tensora momentu sejsmicznego uzyskanego z danych geofizycznych.

Zaproponowana w dysertacji metodyka jest nowym i oryginalnym rozwiązaniem problemu badawczego związanego z opisem zjawiska wstrząsów indukowanych. Świadczy również o dużej wiedzy teoretycznej mgr inż. Natalii

Bugajskiej-Jędraszek z zakresu dyscypliny naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

Do integracji metod InSAR z geofizycznym opisem wstrząsów sejsmicznych, wybrano sześć zjawisk o magnitudach z momentu sejsmicznego od $M_w 4.7$ do $M_w 7.4$, indukowanych działalnością górnictwem, korzystając z bazy danych wstrząsów indukowanych przez człowieka (baza HiQuake, Wilson i inni, 2017). Dwa najsilniejsze zjawiska sejsmiczne miały miejsce w Iranie – magnituda $M_w 7.4$ – eksploatacja wód gruntowych na zachodniej granicy Iranu oraz $M_w 5.7$ – wydobywanie ropy i gazu ziemnego w Łuku Farsa, jedno we Francji (Basen Rodanu) – magnituda $M_w 4.9$ – eksploatacja surowców skalnych w Le Teil oraz trzy w Chinach (Basen Syczuański – magnitudy $M_w 5.0$, $M_w 4.9$ i $M_w 4.7$ – gaz łupkowy i hydroszczelinowanie. Wszystkie ww. zjawiska sejsmiczne charakteryzowały się w miarę płytkimi ogniskami wg. katalogów USGS, CCMT, GEOFON oraz ISCGEM, w zakresie 4-32 km), charakterystycznymi dla wstrząsów indukowanych, ale również dla płytkich trzęsień Ziemi.

Doktorantka w ramach praktycznych obliczeń wyznaczyła i przeanalizowała zmiany powierzchni terenu wywołane sześcioma wybranymi indukowanymi zjawiskami sejsmicznymi. Przemieszczenia LOS dla najsilniejszego zjawiska sejsmicznego $M_w 7.4$ przekroczyły 0.86 m, natomiast dla najslabszego zjawiska o magnitudzie $M_w 4.7$ wyniosły 0.02 m. Natomiast maksymalne przemieszczenia pionowe przekroczyły 0.82 m, a poziome -0.5 m. Z obliczeń można wnioskować o zgodności przemieszczenia z kierunkiem bliskiego uskoku. Ważnych informacji dostarczyły również długookresowe skumulowane przemieszczenia LOS w szeregach czasowych, szczególnie zmiany pre-sejsmiczne przed uruchomieniem głównego uskoku i efektem zaistnienia głównego zjawiska, mogące stanowić prekursor przyszłego zdarzenia. Doktorantka znalazła również deformacje nieciągłe po wstrząsie $M_w 7.4$, wykorzystując w analizie wyniki uśrednionego gradientu fazy. Niestety dla pozostałych słabszych wstrząsów sejsmicznych nie udało się zlokalizować szczelin powierzchniowych. Prawdopodobnie takie efekty mogły na powierzchni nie wystąpić po tych wstrząsach.

Bardzo interesujące i oryginalne były obliczenia wykonane z zastosowaniem górnoprzepustowego filtra Gaussa do rozwiniętych i uśrednionych interferogramów, pozwalające na bardziej precyzyjne wnioskowanie o przebiegu potencjalnej płaszczyzny uskokowej. Zaproponowana metodyka zdała egzamin dla wszystkich sześciu analizowanych indukowanych zjawisk sejsmicznych, poprawiając jakość określenia wzorców przemieszczeń i stanowi znaczące osiągnięcie naukowe doktorantki.

Proces inwersji przeprowadzony dla sześciu wybranych indukowanych zjawisk sejsmicznych pozwolił na odwzorowanie geometrii i kinematyki (m. in. poślizgu i kąta

poślizgu) na prostokątnym modelu uskoku wg. metody Okado. Weryfikację wyników przeprowadzono z wynikami obliczeń sejsmologicznych w ogólnodostępnych bazach danych. W kilku przypadkach wyniki różniły się, ponieważ mapy przemieszczeń po głównych wstrząsach wskazywały na inny przebieg strefy uskoku, który wybierany był jako startowy do obliczeń. Ostateczne wyniki uzyskane w oprogramowaniu GROND (ośrodek warstwowy) były zgodne z referencyjnymi dla dwóch najsilniejszych zjawisk sejsmicznych z Iranu. Natomiast dla pozostałych czterech słabszych wstrząsów sejsmicznych wyniki nie pokrywały się z rozwiązaniem referencyjnym, ale są dobrze dopasowane do przemieszczeń wyinterpretowanych z pomiarów InSAR. Duże różnice obserwuje się w wyznaczonej głębokości ognisk wstrząsów, widoczne nawet w przypadku, gdy parametr ten jest różnie definiowany w geofizycznych katalogach oraz tych obliczanych z interferogramów wg. modelu Okado.

Zgromadzony materiał badawczy stanowi istotny wkład do opisu zjawiska wstrząsu indukowanego działalnością górniczą, uzyskanego na podstawie danych satelitarnych SAR. Pozwala na interpretację silniejszych indukowanych wstrząsów sejsmicznych nawet w obszarach, w których występują ograniczenia w obserwacjach sejsmologicznych.

Należy zauważyć, że doktorantka wykazała się bardzo dużą wiedzą i biegłością w prowadzeniu obliczeń przemieszczeń i stref nieciągłości z danych satelitarnych SAR oraz w modelowaniu źródła sejsmicznego w oparciu o interferogramy SAR.

Literatura wykorzystana podczas realizacji pracy jest właściwa i kompletna. Uwzględnia istotne osiągnięcia naukowe opisane w liczących się, prestiżowych czasopismach z listy JCR, w zakresie tematyki przygotowanej rozprawy doktorskiej.

Ocena oryginalności rozwiązania problemu badawczego

Tematyka dysertacji jest bardzo istotna z kilku względów, między innymi opracowania modelu indukowanego zjawiska sejsmicznego oraz kontrolowania procesów sejsmicznych indukowanych działalnością człowieka.

Doktorantka przedstawiła w rozprawie różne metody badawcze i obliczeniowe. Opracowała metodykę badań w kierunku realizacji celu i tezy pracy. Wykazała się bardzo dobrym przygotowaniem merytorycznym w zakresie badania fizycznego opisu wstrząsów indukowanych działalnością górniczą, z wykorzystaniem metod satelitarnej interferometrii radarowej. Po raz pierwszy opracowana została kompleksowa metodyka integrująca dane radarowe SAR i dane geofizyczne, pozwalająca na powiązanie mechanizmu ścinającego DC powstawania indukowanych wstrząsów sejsmicznych z deformacjami obserwowanymi na powierzchni oraz wykorzystanie

analizy szeregów czasowych przemieszczeń skumulowanych do identyfikacji deformacji pre-sejsmicznych i post-sejsmicznych w celach prognostycznych.

Niewątpliwym sukcesem i oryginalnym rozwiązaniem jest również wykorzystanie metody uśredniania rozwiniętych interferogramów, w analizie słabszych wstrząsów indukowanych. W podejściu tym, po zastosowaniu wyostrzającego filtra Gaussa, możliwe jest bardziej precyzyjne wnioskowanie o przebiegu potencjalnej płaszczyzny uskoku. Zaprezentowany przez doktorantkę kierunek badań jest bardzo przyszłościowy, ponieważ pozwala na interpretację silniejszych indukowanych zjawisk sejsmicznych nawet w obszarach, w których występują braki w seismologicznej sieci obserwacyjnej. Ponadto dane pomiarowe odnoszą się bezpośrednio do przemieszczeń i to w całym badanym obszarze. Takich informacji nie da się uzyskać z interpretacji seismogramów i akcelerogramów rejestrowanych punktowo na kilku stacjach pomiarowych.

Uzyskane wyniki badań przeprowadzonych przez doktorantkę wskazują na duży potencjał stosowania zaawansowanych metod analizy i modelowania danych SAR w obszarach sejsmiczności indukowanej.

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska Pani mgr inż. Natalii Bugajskiej-Jędraszek pod tytułem: *Integracja metod satelitarnej interferometrii radarowej z geofizycznym opisem zjawiska wstrząsów indukowanych*, jest w moim przekonaniu bardzo wartościowa i jest oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego. Doktorantka wykazała się dużą dociekliwością naukową i świetną organizacją badań integrującą różne metody badawcze i obliczeniowe.

Uwagi o charakterze dyskusyjnym

Doceniam znaczenie i wartość opracowanej przez doktorantkę metodyki stosowania metod satelitarnej interferometrii radarowej do opisu zjawiska indukowanych wstrząsów sejsmicznych. Uważam, że tematyka badań i opracowana metodyka przedstawiona w rozprawie doktorskiej jest bardzo rozwojowa i ważna. Ma ona jednak swoje ograniczenia, o czym pisze również doktorantka. Między innymi nie zapewni interpretacji większości indukowanych zjawisk sejsmicznych o niskich magnitudach $M < 3.0$. Mimo wielu zalet i nowych możliwości interpretacji grupy tylko tych silniejszych indukowanych zjawisk sejsmicznych, pojawia się pytanie, czy metodyka w każdym badanym przypadku zapewni odpowiednią wiarygodność poszukiwanych parametrów, szczególnie geometrii uskoku i lokalizacji składowej pionowej. W obliczeniach inwersyjnych przyjmowane są parametry wejściowe, np. współczynnik Poissone'a, prędkość fali sejsmicznej, gęstość. W praktyce wiadomym jest, że parametry te zmieniają się w masywie skalnym i są trudne do wiarygodnego określenia w skali lokalnej. Z dysertacji wynika, że dla modelu jednorodnej

półprzestrzeni sprężystej przyjmowany był wsp. Poissone'a równy 0.25. Powstaje pytanie, jaki wpływ ma błąd wyznaczenia wsp. Poissone'a, na błąd wyznaczenia poszczególnych parametrów geometrycznych modelowego uskoku czy głębokości ogniska wstrząsu. Z kolei dla modelu warstwowego właściwości odwzorowano na podstawie parametrów modelu CRUST2.0 oraz AK135 (prędkość, gęstość i miąższość warstw). W dysertacji podano co prawda percentyle dopasowania modelowego uskoku. Powstaje jednak pytanie, jak błędy modelu warstwowego wpływają na wiarygodność wyznaczonych parametrów źródła sejsmicznego, szczególnie dla lokalnych indukowanych zjawisk sejsmicznych, lokalizowanych płytko pod powierzchnią Ziemi?

Wydaje się, że w przypadku płytkich indukowanych zjawisk sejsmicznych wskazane byłoby zastosowanie lokalnych modeli opartych na rzeczywistych lokalnych badaniach sejsmicznych i/lub otworowych, zamiast globalnego modelu CRUST2.0. Jaki jest pogląd doktorantki w tej sprawie?

Recenzent nie zgłasza uwag krytycznych do zawartości treści merytorycznej rozprawy. Od strony redakcyjnej dysertacja przygotowana jest bardzo starannie i przejrzyście.

Wniosek końcowy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska Pani mgr inż. Natalii Bugajskiej-Jędraszek pod tytułem: *Integracja metod satelitarnej interferometrii radarowej z geofizycznym opisem zjawiska wstrząsów indukowanych* jest oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego i świadczy dostatecznie o ogólnej wiedzy teoretycznej doktorantki w zakresie dyscypliny naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka, a także o umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Uwzględniając powyższe stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Natalii Bugajskiej-Jędraszek, spełnia warunki określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tj. Dz.U. z 2024 r. poz. 1571) i wnoszę, aby Rada Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka na Politechnice Wrocławskiej, dopuściła doktorantkę do dalszych etapów postępowania w ramach przewodu doktorskiego.



