

Sosnowiec, 30 czerwca 2025r.

dr hab. Maciej Mendecki

Instytut Nauk o Ziemi

Wydział Nauk Przyrodniczych

Uniwersytet Śląski w Katowicach

41-200 Sosnowiec

ul. Będzińska 60

tel. 32 3689 362

maciej.mendecki@us.edu.pl

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Natalii Bugajskiej-Jędraszek
„Integracja metod satelitarnej interferometrii radarowej z geofizycznym opisem zjawiska wstrząsów indukowanych”

Recenzja została wykonana na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej nr 206/10/RDND08/2024-2028 z dnia 14 maja 2025r. Rozprawę sporządzono pod kierunkiem promotorów: dr. hab. inż. Wojciecha Milczarka, prof. PWr oraz dr. hab. Grzegorza Lizurka, prof. IGF PAN.

1. Forma i struktura pracy

Rozprawa doktorska mgr inż. Natalii Bugajskiej-Jędraszek liczy 204 strony, w tym 145 stron tekstu zasadniczego. Składa się z siedmiu głównych rozdziałów podzielonych na podrozdziały, ponumerowanych w sposób ciągły zgodnie z układem dziesiętnym. Zawiera również streszczenia w języku polskim i angielskim, podziękowania oraz spisy treści, rysunków i tabel. Dysertacja została uzupełniona o trzy dodatki: A, B i C.

Praca posiada przejrzystą oraz logiczną strukturę. W rozdziale pierwszym przedstawiono motywację stojącą za podjęciem problemu badawczego, określono główne cele i tezę pracy, a także omówiono koncepcję realizacji badań oraz strukturę rozprawy, wskazując uporządkowany i spójny przebieg dalszych rozważań. W rozdziale drugim dokonano przeglądu stanu wiedzy z zakresu sejsmologii, w szczególności charakteryzując zjawisko wstrząsów sejsmicznych, ich klasyfikację, mechanizmy powstawania oraz miary wielkości. Szczególną uwagę poświęcono teorii inwersji oraz modelowaniu źródeł wstrząsów. Trzeci rozdział poświęcono omówieniu podstaw teoretycznych i rozwoju satelitarnej interferometrii radarowej InSAR, w tym metody różnicowej DInSAR, technik szeregu czasowego, dekompozycji przemieszczeń oraz analizy gradientu fazy. W rozdziale czwartym scharakteryzowano obszary objęte badaniami, przedstawiono ich budowę geologiczną, tło sejsmiczne oraz związki pomiędzy aktywnością sejsmiczną a działalnością górnictwem. Rozdział piąty zawiera szczegółowy opis metodyki badań, obejmujący przetwarzanie danych satelitarnych do wyznaczania deformacji powierzchni terenu, a także inwersję źródła wstrząsu z uwzględnieniem korekcji wpływu atmosfery oraz dekompozycji przemieszczeń. W rozdziale szóstym zaprezentowano wyniki analizy przemieszczeń powierzchni, zarówno krótkookresowych, jak i długookresowych oraz deformacji nieciągłych, a także rezultaty inwersji sejsmicznej, które zostały porównane i zinterpretowane w kontekście geofizycznym. Ostatni rozdział zawiera końcowe wnioski płynące z przeprowadzonych badań oraz propozycje dalszych kierunków prac naukowych.

2. Problematyka podjęta w dysertacji

Rozprawa doktorska koncentruje się na problematyce sejsmiczności indukowanej, ze szczególnym uwzględnieniem identyfikacji deformacji powierzchni terenu wywołanych działalnością górniczą oraz analizie mechanizmu powstawania wstrząsów. Główne zagadnienie badawcze dotyczy integracji metod satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR) z geofizycznym opisem zjawisk sejsmicznych. Cele pracy zostały zawarte w 5 punktach oraz jednej tezie badawczej.

Autorka podjęła próbę określenia, w jakim stopniu dane pozyskane z radarów z syntetyczną aperturą (SAR) mogą stanowić samodzielne źródło informacji zarówno o deformacjach powierzchni, jak i o parametrach źródła wstrząsu. Szczególna uwaga została poświęcona krótkookresowym i długookresowym deformacjom terenu oraz pęknięciom nieciągłym, a także możliwościom zastosowania teorii inwersji do modelowania źródła wstrząsu przy wykorzystaniu jedynie danych satelitarnych. Problematyka ta jest bardzo nowatorska i ma istotne znaczenie praktyczne, szczególnie w kontekście monitorowania terenów górniczych oraz predykcji potencjalnych zagrożeń dla powierzchni i infrastruktury.

3. Omówienie merytoryczne treści pracy

Rozprawa mgr inż. Natalii Bugajskiej-Jędraszek stanowi kompleksowe studium integrujące dane satelitarne i metody geofizyczne w kontekście analizy wstrząsów sejsmicznych o charakterze indukowanym. Szczegółowy opis przebiegu badań, zastosowanych metod oraz uzyskanych rezultatów zawarty został w rozdziałach szóstym i siódmym, dlatego szerzej skomentuję tę część rozprawy.

Interesujący i obszerny rozdział szósty został poświęcony przedstawieniu wyników analiz, które podzielono na trzy główne części: analizę zmian powierzchni terenu (ciągłe i nieciągłe), analizę wyników inwersji źródła wstrząsu oraz dyskusję wyników. W pierwszej części zaprezentowano efekty detekcji przemieszczeń powierzchni dla poszczególnych wstrząsów, z uwzględnieniem trzech typów deformacji: krótkookresowych, długookresowych oraz deformacji nieciągłych. Przemieszczenia krótkookresowe zostały wyznaczone na podstawie interferogramów różnicowych (DInSAR) z korekcją troposferyczną, natomiast komponenty ruchu pionowego i poziomego uzyskano poprzez dekompozycję danych z orbit wstępującej i zstępującej. Dane te pozwoliły na identyfikację wpływu poszczególnych wstrząsów na przemieszczenia powierzchni w bezpośrednim następstwie zdarzenia sejsmicznego. W dalszej kolejności dokonano estymacji przemieszczeń długookresowych w szerszym oknie czasowym (cztery miesiące przed i po zdarzeniu), z wykorzystaniem techniki SBAS. Dzięki temu możliwe było uchwycenie tendencji deformacyjnych związanych z procesami poprzedzającymi i następującymi po głównym wstrząsie. Poza analizą deformacji ciągłych, zidentyfikowano deformacje nieciągłe poprzez analizę gradientu fazy, co umożliwiło wykrycie pęknięć powierzchniowych oraz określenie kierunku przemieszczeń wzdłuż stref deformacji. W drugiej części rozdziału szóstego zaprezentowano wyniki inwersji źródła wstrząsu sejsmicznego. Do obliczeń wykorzystano dane SAR jako jedyne źródło obserwacyjne, a modelowanie przeprowadzono w podejściu probabilistycznym (metoda Bayesa) z zastosowaniem teorii inwersji. Źródło zjawiska modelowano jako prostokątną powierzchnię uskoku o jednorodnym poślizgu, bazując na modelu Okady. Przeprowadzono dwuetapową analizę – najpierw z wykorzystaniem jednorodnego modelu półprzestrzeni sprężystej, a następnie bardziej złożonego modelu warstwowego uwzględniającego pionową zmienność prędkości propagacji fal sejsmicznych. Dla każdego analizowanego przypadku przedstawiono parametry geometryczne płaszczyzny uskoku (lokalizację epicentrum, azymut, kąt nachylenia, kierunek i wielkość poślizgu), które porównano z danymi referencyjnymi lub katalogowymi, jeśli były dostępne. Ostatnia część szóstego rozdziału poświęcona została dyskusji wyników. Autorka zestawiała uzyskane rezultaty z danymi literaturowymi, poddała

je ocenie pod kątem wiarygodności oraz zaproponowała możliwe interpretacje obserwowanych rozbieżności. Wskazano m.in., jak różne typy działalności górniczej (np. wydobywanie surowców, wtlaczanie cieczy, szczelinowanie) wpływają na charakter deformacji oraz jakie ograniczenia wynikają z jakości i dostępności danych satelitarnych. Przedyskutowano także zależności pomiędzy wielkością wstrząsu (magnitudą), topografią terenu, a skalą zaobserwowanych deformacji.

Rozdział siódmy zawiera konstruktywne i kompleksowe podsumowanie przeprowadzonych badań. Na jego podstawie sformułowano wnioski końcowe, które potwierdzają przydatność metod satelitarnej interferometrii radarowej w analizie zjawisk sejsmicznych o charakterze indukowanym. W szczególności podkreślono możliwość zastosowania danych SAR jako niezależnego źródła informacji do estymacji parametrów źródła wstrząsu oraz wykrywania deformacji terenu w różnych skalach czasowych. Zidentyfikowano również ograniczenia, takie jak wpływ pokrycia terenu, warunki atmosferyczne czy niewielka amplituda deformacji w przypadku słabszych wstrząsów. W ostatniej części rozdziału przedstawiono potencjalne kierunki dalszych badań, wśród których znalazły się m.in. integracja danych SAR z innymi źródłami (GNSS, dane geologiczne), rozwój bardziej zaawansowanych modeli źródła oraz dalsze badania nad prognozowaniem wpływów deformacyjnych w kontekście sejsmiczności indukowanej.

4. Uwagi i komentarze

Rozprawa doktorska mgr inż. Natalii Bugajskiej-Jędraszek została przygotowana na bardzo wysokim poziomie merytorycznym i metodologicznym. Praca podejmuje aktualne, interdyscyplinarne zagadnienie o istotnym znaczeniu praktycznym i naukowym, jakim jest analiza wpływu sejsmiczności indukowanej na powierzchnię terenu. Szczególnym atutem rozprawy jest umiejętne połączenie technik satelitarnych (InSAR) z metodami sejsmologicznymi, co pozwala na nowatorskie spojrzenie na problem identyfikacji i modelowania źródeł wstrząsów związanych z działalnością człowieka. Autorka wykazała się bardzo dobrą znajomością zarówno aspektów teoretycznych, jak i praktycznych analizowanych zagadnień. Rozdziały poświęcone bayesowskiej teorii inwersji, mechanizmowi ogniskowemu i analizie danych SAR zostały opracowane z dużą starannością i ze zrozumieniem istoty problemu. Na szczególne wyróżnienie zasługuje dbałość o jakość i przejrzystość prezentowanych wyników - ilustracje, mapy deformacji oraz zestawienia tabelaryczne znacząco podnoszą wartość informacyjną pracy. Mocną stroną dysertacji jest również krytyczne podejście do stosowanych metod. Autorka nie ogranicza się do przedstawienia rezultatów, lecz analizuje ich wiarygodność, wskazuje na ograniczenia danych (np. wynikające z pokrycia terenu, warunków atmosferycznych czy geometrii satelitów) oraz proponuje możliwości ich interpretacji. Takie podejście świadczy o dojrzałości naukowej i dobrze przemyślanej koncepcji badawczej. Zasługuje na uwagę także obszerna i aktualna bibliografia obejmująca zarówno źródła polskojęzyczne, jak i anglojęzyczne, w tym liczne publikacje z ostatnich lat.

Pewnym ograniczeniem pracy, wynikającym raczej z charakteru danych topograficznych, jest brak bezpośredniego porównania z danymi niezależnymi, które mogłyby dodatkowo zwiększyć wiarygodność niektórych analiz. Autorka słusznie jednak wskazuje, że dane InSAR stanowią cenne, niezależne źródło obserwacji, zwłaszcza w trudno dostępnych obszarach i w warunkach ograniczonego dostępu do pomiarów terenowych.

Chciałbym zwrócić też uwagę na kilka krytycznych spostrzeżeń. W niektórych miejscach przeprowadzone obszerne analizy są słabo czytelne. Rozumiem, że prezentacja zmian parametrów w czasie i przestrzeni to trudne zagadnienie. Rysunek 6.17 jest przykładem takiej prezentacji — o ile zmiany przestrzenne są dobrze przedstawione, o tyle zmiany czasowe są trudne do uchwycenia, zwłaszcza w kontekście jednego z wniosków końcowych, wskazującego na większe amplitudy zmian w czasie przed wstrząsem głównym

niż po jego wystąpieniu. Sugerowałbym, aby uzupełnić ten wniosek o wykresy pokazujące zmiany w czasie na przykład dla jednego punktu, tj. środka profilu lub maksymalnej wartości. Uważam również, że pomimo dużego wkładu pracy Autorki, w rozprawie zabrakło podrozdziału poświęconego ocenie statystycznej otrzymanych modeli. Statystyki podstawowe towarzyszą prezentowanym wynikom obliczeń, jednak koherentna ocena modeli - porównanie wyników własnych analiz (tj. otrzymanych wartości optymalnych po inwersji) z danymi literaturowymi (na zasadzie 1:1, np. porównanie parametrów źródła) - znacząco wzbogaciłaby pracę oraz wzmocniła końcowe konkluzje. Zabrakło również zastosowania innych narzędzi statystycznych oceniających finalne rezultaty, jak np. oszacowania RMS, funkcji *likelihood* dającej bezpośrednią miarę dopasowania modelu do danych, czy też innych miar jakości predykcyjnej typowych dla podejścia bayesowskiego.

Z punktu widzenia językowego, redakcyjnego i stosowanego słownictwa rozprawa została przygotowana poprawnie, choć miejscami pojawiają się nieco zbyt rozbudowane zdania. Styl pracy jest jednak spójny, a język adekwatny do charakteru publikacji naukowej. Niemniej jednak w pracy można znaleźć drobne nieścisłości dotyczące definicji. Autorka w rozdziale 2.1 przyrównuje ognisko wstrząsu do hipocentrum jako miejsca, z którego uwalniana jest energia. Brzmi to nieco niefortunnie, ponieważ ognisko może być rozumiane jako objętość skał, w której doszło do zniszczenia i uwolnienia energii, natomiast hipocentrum jest punktem matematycznym, wyznaczanym w procesie lokalizacji. Podobny problem z definicjami pojawia się w rozdziale 2.2, gdzie zdefiniowano obszary sejsmiczne jako granice płyt tektonicznych, uskoki oraz strefy subdukcji. Tymczasem strefy subdukcji i uskoki transformujące, obok stref ryftowych, są typami granic płyt tektonicznych. W rozdziale 2.2.2 Autorka omawia antropogeniczne przyczyny powstawania trzęsień ziemi, w tym te wywoływane przez podziemne górnictwo konwencjonalne. Zwraca uwagę na tąpnięcia górnicze jako przyczynę deformacji powierzchni. Tąpnięcie jest szczególnym przypadkiem wstrząsu górniczego, który prowadzi do przerwania ciągłości prac w wyrobisku. Natomiast częściej występują wstrząsy górnicze niepowodujące uszkodzeń, ale mające istotny wpływ na powierzchnię terenu. W rozdziale 2.4 omawiana jest część teoretyczna dotycząca energii sejsmicznej. Podano tam relację 2.6 (magnituda – energia sejsmiczna), która jest poprawna, jednak uważam, że energię sejsmiczną można lepiej zdefiniować poprzez podstawowe równanie całkowite opisujące wypromieniowaną energię jako funkcję kwadratu amplitudy prędkości fali. Chciałbym również zwrócić uwagę na niefortunne zastosowanie skrótu FEM w odniesieniu do fali elektromagnetycznej (od rozdziału 3.1). Skróót FEM jest już powszechnie kojarzony z metodą elementów skończonych (*Finite Element Method*), dlatego sugeruję stosowanie formy „fala EM”. Z kolejnych drobnych uwag: na schemacie 5.2 brakuje informacji, na którym etapie wykonywane jest wsteczne geokodowanie, choć proces ten został opisany w tekście (rozdział 5.1.2). We wnioskach końcowych (rozdział 7.1) Autorka odwołuje się do rysunków 5.4e i 5.4f, które nie występują w recenzowanej wersji pracy.

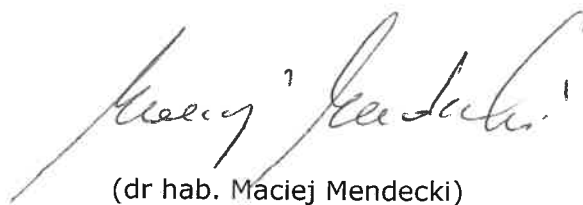
Podsumowując, dysertacja mgr inż. Natalii Bugajskiej-Jędraszek, mimo kilku uwag krytycznych, zasługuje na bardzo wysoką ocenę. Praca nie tylko wnosi oryginalny wkład w rozwój wiedzy na temat sejsmiczności indukowanej i jej skutków powierzchniowych, ale również dostarcza praktycznych narzędzi analitycznych, które mogą znaleźć zastosowanie w prognozowaniu i monitorowaniu wpływów działalności górniczej.

Wniosek końcowy

Stwierdzam, że wyniki zaprezentowane w rozprawie doktorskiej mgr inż. Natalii Bugajskiej-Jędraszek stanowią oryginalne i wartościowe rozwiązanie problemu naukowego z zakresu analizy sejsmiczności indukowanej, przy wykorzystaniu nowoczesnych metod satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR). Autorka podjęła udaną próbę integracji danych satelitarnych z teorią inwersji w celu rekonstrukcji parametrów źródeł wstrząsów sejsmicznych oraz identyfikacji deformacji powierzchni terenu, co wnosi nową jakość do dotychczasowych metod badań zjawisk geofizycznych związanych z działalnością górniczą.

Cele pracy zostały osiągnięte, a uzyskane wyniki posiadają nie tylko wysoką wartość poznawczą, lecz także potencjał praktycznego zastosowania w monitorowaniu wpływu eksploatacji górniczej na środowisko. Praca została przygotowana zgodnie z wymaganiami formalnymi i prezentuje bardzo wysoki poziom merytoryczny. Na szczególne uznanie zasługuje umiejętność zastosowania zaawansowanego warsztatu badawczego obejmującego analizę krótkookresowych i długookresowych deformacji, modelowanie geometrycznych parametrów źródeł wstrząsów, korekcję danych interferometrycznych z uwzględnieniem wpływów atmosferycznych oraz analizę deformacji nieciągłych. Autorka wykazała się dużą biegłością w stosowaniu metod przetwarzania danych satelitarnych, modelowaniu procesów geofizycznych oraz interpretacji wyników w kontekście realnych zagrożeń dla powierzchni terenu.

Biorąc pod uwagę interdyscyplinarny charakter badań, oryginalność podejścia badawczego oraz wysoki poziom wykonania i opracowania wyników, stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Natalii Bugajskiej-Jędraszek spełnia wymagania określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2023, poz. 742) i wnioskuję o dopuszczenie pracy do publicznej obrony rozprawy doktorskiej. Uwzględniając nowatorskie zastosowanie danych InSAR w analizie źródeł sejsmicznych, spójność metodyczną pracy oraz znaczenie uzyskanych wyników dla rozwoju badań nad sejsmicznością indukowaną, wnioskuję również o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.



(dr hab. Maciej Mendecki)