

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ MGR INŻ. ANNY KOPEĆ pt.:
„Metodyka przetwarzania danych interferometrycznych w aspekcie oddziaływania
podziemnej eksploatacji górniczej na powierzchnię terenu”

1. Ocena doboru tematyki badawczej i przyjętej tezy pracy

Przemieszczenia powierzchni terenu będące wynikiem przekształceń geodynamicznych oraz działalności człowieka mogą być wyznaczane różnymi metodami geodezyjnymi. Jedną z tych metod, znajdującą obecnie coraz większe zastosowanie, jest pomiar teledetekcyjny z wykorzystaniem interferogramów utworzonych na podstawie wysokorozdzielczych satelitarnych obrazowań radarowych. Metodę tę cechuje duży zakres terytorialny pomiaru, relatywnie wysoka dokładność oraz zmniejszający się wraz z kolejnymi misjami satelitarnymi dostarczającymi obrazowania SAR odstęp czasowy pomiędzy kolejnymi pomiarami tego samego obszaru.

Wykorzystanie zalet pomiaru teledetekcyjnego wymaga odpowiedniego przetworzenia danych interferometrycznych opracowywanych na podstawie obrazowań z radarów z syntetyczną aperturą. Opracowanie takie musi pozwalać na właściwy dobór interferogramów oraz na ograniczenie wpływu czynników zewnętrznych na falę elektromagnetyczną będącą nośnikiem informacji, które to elementy, oprócz rozdzielczości przestrzennej piksela, decydują o dokładności wyznaczanych przemieszczeń. Przyjęcie właściwej metodologii opracowania rezultatów pomiarów teledetekcyjnych jest podstawowym warunkiem otrzymania wyników zgodnych z rzeczywistością.

Autorka w swojej dysertacji postawiła sobie za cel opracowanie metodyki przetwarzania obrazowań interferometrycznych pozwalającej na zwiększenie dokładności opisu przemieszczeń terenu wywołanych eksploatacją górniczą prowadzoną na obszarze Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego (LGOM). Oddzielnie zajęła się możliwością zwiększenia dokładności pomiaru wpływu wstrząsów górniczych powodujących krótkookresowe przemieszczenia powierzchni terenu, oraz wpływu prowadzonej eksploatacji górniczej skutkującej deformacjami zachodzącymi w znaczenie dłuższym przedziale czasu. Przeanalizowała wpływ takich czynników, jak:

- wpływ opóźnienia troposferycznego na pomiar przemieszczeń krótko- i długookresowych techniką krótkich baz,
- wybór modelu statystycznego w procesie rozwijania fazy interferogramów SAR dla przemieszczeń krótkookresowych,
- wpływ doboru baz czasowo-przestrzennych na pomiar przemieszczeń długookresowych techniką SBAS.

Innowacyjne podejście do wykorzystania technik InSAR w wielkopowierzchniowym monitoringu przemieszczeń powierzchni powodowanych wstrząsami górniczymi (przemieszczenia krótkookresowe) i prowadzoną eksploatacją górniczą (przemieszczenia

długookresowe), skutkujące zwiększeniem dokładności i wiarygodności takich pomiarów, uważam za właściwe i godne poparcia.

2. Omówienie zakresu i głównych rezultatów opiniowanej pracy

Opiniowana praca liczy 187 stron. Zawiera spis 167 pozycji literatury, w tym 30 pozycji polskojęzycznych i 137 pozycji w języku angielskim. Jest bogato ilustrowana, gdyż zamieszczono w niej 74 rysunki (w tym 9 w załącznikach). Ważniejsze treści podsumowujące i liczbowe zostały przedstawione w 17 tabelach (w tym 1 w załączniku).

Całość pracy opisano w 6 rozdziałach.

W **rozdziale 1** („Wstęp”) przedstawiono cel i zakres pracy.

Autorka określiła w nim czym kierowała się podejmując tematykę doskonalenia metod opracowania interferogramów prowadzącą do zwiększenia dokładności i pewności pomiarów przemieszczeń krótko- i długookresowych powodowanych eksploatacją górnictwem prowadzoną w kopalniach LGOM. Podała także jaki jest główny cel pracy oraz cele szczegółowe, a także sformułowała następującą tezę pracy:

Dobór metodyki przetwarzania danych interferometrycznych SAR ma istotne znaczenie dla możliwości wykorzystania technik InSAR do monitoringu przemieszczeń terenu wywołanych podziemną działalnością górnictwem.

W rozdziale tym Doktorantka przedstawiła także zakres tematyczny poszczególnych rozdziałów pracy.

W **rozdziale 2** („Stan wiedzy dotyczący problemu badawczego”) przedstawiono dotychczasowe osiągnięcia badawcze z zakresu tematyki prezentowanej w pracy.

Rozdział ten został podzielony na sześć podrozdziałów, przy czym dwa pierwsze dotyczą oddziaływania podziemnej eksploatacji górnictwem na powierzchnię terenu, zaś w kolejnych omówione zostały podstawowe informacje dotyczące pomiarów techniką InSAR.

W pierwszym podrozdziale Autorka omówiła zagadnienia związane z wpływem eksploatacji górnictwem na powierzchnię terenu w tym przede wszystkim podała czynniki wpływające na wielkość i zasięg deformacji ciągłych.

W drugim podrozdziale przedstawiła podział wpływów eksploatacji górnictwem na powierzchnię terenu, czynniki wpływające na wielkość deformacji powierzchni terenu powodowanych podziemną eksploatacją górnictwem, metody pomiaru stosowane przy wyznaczaniu deformacji powierzchni terenu górnictwem oraz podział metod prognozowania wpływów.

Zdaniem recenzenta podrozdział ten jest zbyt rozbudowany, gdyż Autorka w swoich badaniach przedstawionych w pracy nie wykorzystywała prognoz wpływów eksploatacji górnictwem oraz nie korzystała z wyników pomiarów deformacji powierzchni terenu górnictwem wykonywanych innymi metodami poza metodą pomiaru teledetekcyjnego. Omawiając numeryczne metody prognozowania nie wspomniała ponadto o badaniach nad dyskretnym i stochastycznym modelem oddziaływania eksploatacji górnictwem przeprowadzonych przez dr hab. inż. T. Niemca oraz o metodzie automatów komórkowych zastosowanej do prognozowania deformacji przez dr inż. P. Sikorę.

W trzecim podrozdziale Doktorantka szeroko i wnikliwie opisała podstawowe założenia pomiarów techniką InSAR. Podała zasadę działania satelitarnych systemów telemetrycznych, przedstawiła stosowane rodzaje trybów akwizycji danych sensorów SAR oraz przedstawiła zestawienie obecnie działających platform teledetekcyjnych z sensorami SAR wraz z ich charakterystyką.

W następnych punktach tego podrozdziału przedstawiła etapy przetwarzania danych SAR prowadzące do wyznaczenia przemieszczeń techniką interferometrii radarowej SAR. Omówiła także techniki InSAR oparte na analizach szeregów czasowych (techniki SBAS i PSI), które zwiększają dokładność i rozszerzają możliwości technik InSAR w zakresie obserwacji zmian zachodzących na powierzchni terenu.

Czwarty podrozdział Autorka poświęciła ograniczeniom pomiarów techniką InSAR. Zdefiniowała pojęcie koherencji, a także omówiła będące źródłami błędów następujące dekorelacje: termiczną, geometryczną, centroidu Dopplerowskiego, czasową, objętościową, związane z procesem przetwarzania danych. Oddzielnie omówiła błędy wektora stanu satelity, które prowadzą do błędnego wyznaczenia przestrzennej bazy interferometrycznej, co bezpośrednio przekłada się na zaburzenia fazy interferogramów.

Problematykę błędów występujących przy pomiarach techniką InSAR Doktorantka kontynuowała w kolejnym (piątym) podrozdziale rozdziału 2. Opisała w nim problematykę wpływu opóźnień atmosferycznych (jonosferycznego i troposferycznego) na propagację fali elektromagnetycznej, a tym samym na pomiary SAR. Z przedstawionych rozważań wynika, że wpływ troposfery na pomiary techniką InSAR jest zagadnieniem bardzo istotnym i złożonym. Autorka podaje, że stosuje się różne podejścia do redukcji tego wpływu, wśród których można wyróżnić dwie grupy: oparte na filtracji i statystycznym wyznaczaniu wpływu troposfery bezpośrednio z danych SAR oraz z wykorzystaniem niezależnych danych, na przykład pomiarów GNSS, modeli pogodowych, danych spektrometrycznych. Metody korekcji troposferycznych dla pomiarów wykonywanych techniką InSAR Doktorantka omówiła w dalszej części tego podrozdziału.

W szóstym podrozdziale Autorka dokonała przeglądu wykorzystania na świecie i w Polsce technik InSAR do wyznaczenia przemieszczeń terenu związanych z działalnością górnictwem. Podała także przegląd prac badawczych nad redukcją wpływu czynników zewnętrznych i dekorelacji na pomiary technikami InSAR w badaniu przemieszczeń wywołanych działalnością górnictwem. Z przeglądu tego wynika, że problematyka redukcji wpływu czynników zewnętrznych na pomiary techniką InSAR ma istotne znaczenie. Dlatego też w swojej dysertacji Autorka skupiła się na metodyce przetwarzania interferogramów SAR, pozwalającej na zwiększenie wiarygodności przemieszczeń powierzchni terenu na obszarach górniczych z wykorzystaniem techniki InSAR.

Rozdział 3 („Obszar badawczy”) zawiera zaczerpnięte z literatury podstawowe informacje geologiczne na temat Legnicko – Głogowskiego Okręgu Miedziowego, tj. rejonu, w którym Autorka prowadziła swoje badania. W rozdziale tym omówiła także opisane w różnych pracach wielkości dotychczasowych obniżen powierzchni terenu i ich maksymalne przyrosty stwierdzone techniką InSAR. Przedstawiła również czynniki wynikające z ukształtowania i zagospodarowania terenu, a także z przyczyn klimatyczno-przyrodniczych wpływające na dokładność pomiarów techniką InSAR.

Szkoda, że Autorka nie wykorzystała przy prezentowaniu tematyki zawartej w tym rozdziale materiałów z kopalń LGOM dotyczących geologii, zakresu dokonanej eksploatacji górniczej i jej wpływu na powierzchnię terenu. Niewątpliwie istotnie zwiększyłyby to możliwości weryfikacji uzyskanych wyników badań przedstawionych w pracy i interpretacji przyczyn pomierzonych deformacji.

Zasadnicza część pracy zawarta jest w rozdziałach 4 i 5, w których opisano przeprowadzone przez Doktorantkę badania nad dobozem metodyki przetwarzania danych interferometrycznych SAR umożliwiające zwiększenie dokładności monitoringu krótko- i długookresowych przemieszczeń powierzchni terenu wywoływanych statycznymi i dynamicznymi wpływami eksploatacji górniczej.

W **rozdziale 4** („Metodyka badań – realizacja celów pracy”) Doktorantka opisała podstawy metodyki opracowania interferogramów SAR zastosowanej w pracy do wyznaczania przemieszczeń krótko- i długookresowych powodowanych wpływami górnictwami.

Do badań wykorzystano 44 zobrażenia uzyskane z satelitów SAR – Sentinel-1 A/B. Podstawowe obliczenia związane z przetwarzaniem tych zobrażeń (wstępne przetwarzanie zobrażeń, dopasowanie zobrażeń oraz filtracja zobrażeń) zostały wykonane w środowisku GMTSAR oraz GMT. Do korekcji stanu satelity wykorzystano precyzyjne efemerydy dostarczone przez Sentinel-1 Quality Control Subsystem. Korekcję geometryczną sygnału przeprowadziła na podstawie numerycznego modelu terenu utworzonego w ramach misji Shuttle Topography Mission, w rozdzielczości 1”. Fazy interferogramów poddała dwuetapowej filtracji, filtrem Gaussa oraz zmodyfikowanym algorytmem filtracji Goldsteina. Proces rozwijania fazy interferometrycznej przeprowadziła z wykorzystaniem Statistical-cost Network-flow Algorithm for Phase Unwrapping.

Wszystkie zobrażenia zostały przetworzone w celu utworzenia interferogramów różnicowych. Na podstawie 24 zobrażeń z okresu od października 2017 r. do marca 2018 r. utworzyła łącznie 276 interferogramów, które zostały wykorzystane do analizy szeregów czasowych z zastosowaniem zmodyfikowanej techniki SBAS. Utworzenie szeregu czasowego zobrażeń pozwoliło na obserwację przemieszczeń długookresowych będących skutkiem prowadzonej eksploatacji górniczej.

Do wyznaczenia przemieszczeń krótkookresowych związanych z przemieszczeniami powierzchni terenu zaistniałymi po sześciu wstrząsach o sile większej od 3,0 Mw wykorzystano 24 zobrażenia. Łącznie zostało utworzonych 12 interferogramów, po dwa dla każdego wstrząsu.

Dla 80 wybranych na podstawie najwyższych wartości mediany koherencji interferogramów wykorzystanych do wyznaczenia przemieszczeń długookresowych oraz 12 interferogramów wykorzystanych do wyznaczenia przemieszczeń krótkookresowych została wykonana korekcja wpływu opóźnienia troposferycznego. W tym celu Autorka wykorzystano poprawkę GACOS, gdzie opóźnienie jest wyznaczane na podstawie modelu ITD. Dane te są udostępniane w postaci map reprezentujących całkowite opóźnienie zenitalne. Wprowadzenie poprawki GACOS dla interferogramów wykorzystywanych do wyznaczenia przemieszczeń długookresowych techniką SBAS pozwoliło Doktorantce sprawdzić, jaki wpływ ma wykonanie tej dodatkowej redukcji (w zasadzie wpływ ten ulega redukcji

bezpośrednio w trakcie przetwarzania szeregu czasowego) na wynik przetwarzania zobrażeń techniką SBAS.

Autorka zbadała także wpływ wyboru modelu statystycznego w procesie rozwijania fazy. Badanie to przeprowadziła dla interferogramów wykorzystanych do pomiaru przemieszczeń indukowanych zdarzeniami sejsmicznymi. Dla każdego interferogramu procedurę rozwijania fazy interferometrycznej wykonywała dwukrotnie: na podstawie modelu statystycznego nieuwzględniającego deformacji powierzchni terenu (MS0) oraz na podstawie modelu, który uwzględnia deformacje (MS1) – dopuściła możliwość przeskoczenia cyklu fazy o 1 (2,8 mm). W celu porównania wyników z obu modeli wyznaczała ich różnicę (MS0 – MS1).

Dla przemieszczeń krótkookresowych wykonała dodatkowo dekompozycję wektora u_{LOS} na składową pionową i poziomą w płaszczyźnie wschód-zachód. Stwierdziła, że pozwala to na wyznaczenie pochodnych obniżenia (T i K) dla konkretnej linii profilowej oraz odkształcenia poziomego dla kierunku wschód-zachód. Niestety nie pokazała wyników obliczenia tych pochodnych, zatem trudno stwierdzić, czy rozkłady tych wskaźników deformacji odpowiadają przynajmniej jakościowo rozkładowi obserwowanym na liniach pomiarowych założonych w terenach górniczych.

Walidacji zastosowanej metodyki opracowania interferogramów SAR dla przemieszczeń krótkookresowych Doktorantka przeprowadziła poprzez dopasowanie metodą najmniejszych kwadratów krzywej teoretycznej reprezentującej wysyp szczelinowy do zbioru punktów o wyznaczonych obniżeniach, których położenie charakteryzowała odległość od środka ciężkości niecki osiadania. Dopasowanie takie zostało wykonane dla wyników pomiarów: bez korekcji, z uwzględnieniem korekcji troposferycznej oraz z uwzględnieniem korekcji troposferycznej i modelu MS1. Wyznaczenie współczynnika determinacji R^2 oraz stałej c określającej wielkość przesunięcia krzywej teoretycznej poza zasięgiem wpływów względem zera pozwoliło Autorce określić, w jaki sposób zastosowana metodyka wpływa na rozproszenie wyników pomiaru zjawiska oraz umożliwiło redukcję błędów o charakterze systematycznym.

Przy wyznaczaniu przemieszczeń długookresowych techniką SBAS Doktorantka z wyjściowego zbioru 80 interferogramów dokonała przy pomocy specjalnego algorytmu tworzącego losowe zbiory kombinacji interferogramów wyboru 40 interferogramów, W tym procesie przyjęła, że wszystkie zobrażenia muszą zostać wykorzystane do utworzenia węzłów sieci połączeń oraz, że zbiór wylosowanych interferogramów musi tworzyć spójną sieć.

Do obliczenia szeregów czasowych wykorzystwała zmodyfikowany algorytm SBAS. Dla zbioru wyników losowych kombinacji algorytmu SBAS w postaci skumulowanych wartości przemieszczeń za cały badany okres wyznaczyła rastry podstawowych statystyk opisowych w postaci średniej arytmetycznej i odchylenia standardowego. Wykonała również profile przez wybrane niecki obniżeniowe wraz z określonymi przedziałami ufności. Wyniki uzyskane przy pomocy zaproponowanego algorytmu porównała z wynikami otrzymanymi na podstawie standardowego podejścia, gdzie kombinacje interferogramów do algorytmu SBAS są definiowane tylko na podstawie bazy czasowej i przestrzennej.

Rozdział 5 („Wyniki badań i analiz”) poświęcony został przedstawieniu rezultatów pomiarów przemieszczeń krótko- i długookresowych wywołanych wpływami podziemnej eksploatacji górniczej przy zastosowaniu technologii InSAR.

W przypadku wyznaczania przemieszczeń krótkookresowych techniką InSAR Doktorantka rozpatrzyła szczegółowo każdy z sześciu analizowanych wstrząsów pod kątem następujących analizy:

- wpływu zmian modelu statystycznego w procesie rozwinięcia fazy, poprzez jakościowe porównanie wyników otrzymanych z wykorzystaniem modelu MN0 i MS1. Porównanie to zostało przeprowadzone oddzielnie dla obydwu ścieżek (wstępującej i zstępującej) i przedstawione na obrazach przemieszczeń LOS oraz na wykresach tych przemieszczeń wzdłuż linii profilowej wschód – zachód przechodzącej przez środek niecki obniżeniowej.
- wpływu zastosowania poprawki troposferycznej GACOS na wyniki pomierzone przemieszczenia LOS. Porównanie to zostało przeprowadzone w podziale na ścieżkę wstępującą i zstępującą poprzez pokazanie obrazów zwiniętej fazy interferogramu, przemieszczeń LOS, różnicowego rozkładu opóźnienia troposferycznego oraz przemieszczeń LOS po korekcji, a także wykresów zmian przemieszczeń LOS przed i po korekcji wzdłuż linii profilowej wschód – zachód przechodzącej przez środek niecki obniżeniowej. Doktorantka wyznaczyła również histogramy częstości dla wartości przemieszczeń LOS, przed i po korekcji. Ponadto dla każdego rastra z przemieszczeniami LOS, przed i po korekcji, wyznaczono podstawowe charakterystyki w postaci: wartości średniej arytmetycznej oraz odchylenia standardowego.

Analizy te nie prowadziły do uzyskania jednoznacznych wyników we wszystkich rozpatrywanych przypadkach.

W kolejnym podpunkcie przedstawiła dla każdego wstrząsu opis wyników pomiarów techniką DInSAR wraz z dekompozycją wektora LOS. Rezultaty dekompozycji wektora LOS w postaci przemieszczeń pionowych (z uwzględnieniem poprawki troposferycznej GACOS i dla modelu MS1) wraz z wyjściowymi przemieszczeniami LOS ze ścieżek wstępującej i zstępującej przedstawiła na rysunkach. Na rysunkach pokazała także mapy zarejestrowanych obniżen uzyskane bez korekcji, z uwzględnieniem korekcji troposferycznej i modelu MS0, oraz z uwzględnieniem korekcji troposferycznej i modelu MS1. Dla każdej z tych map przedstawiono wykresy punktowe wartości obniżen w funkcji odległości od środka ciężkości, wraz z dopasowanymi do nich metodą najmniejszych kwadratów przebiegami teoretycznymi określonymi przez wysyp szczelinowy. Dobroć dopasowania została określona poprzez współczynnik determinacji R^2 i czynnik systematyczny c .

Należy podkreślić, że zastosowana metodologia walidacji metodyki opracowania interferogramów SAR jest znacznym uproszczeniem rzeczywistego przebiegu zjawiska obniżen powierzchni terenu wywołanych zjawiskami sejsmicznymi. Efektem tego są relatywnie niskie wartości współczynników determinacji uzyskane z dopasowania krzywej teoretycznej do pomierzonych obniżen.

Badania przeprowadzone przez Doktorantkę umożliwiły zaproponowanie w dysertacji metodyki postępowania w przypadku przetwarzania danych interferometrycznych SAR, która umożliwi pozyskanie najbardziej wiarygodnych wyników pomiarów krótkookresowych przemieszczeń powierzchni terenu wywołanych działalnością górnictw, z wykorzystaniem techniki pomiarowej DInSAR.

W drugim podpunkcie rozdziału 5 Doktorantka przedstawiła wyniki swoich badań nad pomiarami techniką InSAR przemieszczeń długookresowych wywołanymi wpływami podziemnej eksploatacji górnictw. Pokazała mapę uzyskanych na podstawie 100 kombinacji

SBAS skumulowanych przemieszczeń LOS pozwalających na wyodrębnienie sześciu niecek obniżeniowych powstałych w okresie od 18 października 2017 r. do 27 maja 2018 r. w obszarach górniczych kopalń „Lubin” i „Rudna”. Mapa ta posłużyła do wykonania wykresów przemieszczeń LOS wzdłuż linii przechodzących z zachodu na wschód przez centralną część niecek obniżeniowych. Profile te cechują się zmienną wartością koherencji i zmienną wartością odchylenia standardowego na poszczególnych ich odcinkach. W tym kontekście zestawiała statystyki wartości koherencji oraz statystyki wartości odchylenia standardowego dla różnych typów pokrycia terenu uzyskane ze zbioru wybranych 80 interferogramów.

Doktorantka porównała także przemieszczenia uzyskane przy wyborze bazowego zbioru interferogramów opartym na kryterium mediany koherencji poszczególnych interferogramów z wynikami przemieszczeń uzyskanymi przy klasycznym podejściu do takiego doboru opartym na kryteriach bazy czasowej i przestrzennej. Wyniki takiego porównania pokazała na wykresach uzyskując najgłębsze profile niecek przy obliczeniach wykonanych według procedury zaproponowanej przez Autorkę.

Na zakończenie Doktorantka dokonała analizy wpływu poprawki troposferycznej GACOS na wyniki pomiaru przemieszczeń. Rezultaty tej analizy przedstawiła w formie statystyk opisowych dla wartości odchylenia standardowych od wartości średniej przemieszczeń LOS dla 100 kombinacji SBAS wykonanych dla interferogramów bez uwzględnienia poprawki troposferycznej i z uwzględnieniem poprawki troposferycznej GACOS. Według Autorki zastosowanie dodatkowej poprawki troposferycznej dla każdego interferogramu pozwala na dodatkową redukcję błędów systematycznych, wynikających z globalnego wpływu troposfery na pomiary techniką InSAR.

Rozdział 6 („Podsumowanie i wnioski końcowe”) zawiera wnioski szczegółowe i ogólne wynikające z przeprowadzonych badań nad pomiarami techniką InSAR przemieszczeń krótko- i długookresowych wywoływanych wpływami dynamicznymi i statycznymi prowadzonej eksploatacji. Wnioski te w należyтым stopniu udowadniają tezę sformułowaną w rozdziale 1 pracy.

3. Ocena omawianej pracy doktorskiej

W opiniowanej pracy doktorskiej podjęto tematykę doskonalenia opracowania obrazów SAR wykorzystywanych do pomiaru krótko- i długookresowych przemieszczeń powierzchni terenu powodowanych wstrząsami górotworu i prowadzoną eksploatacją górniczą. Tematykę tę zrealizowała poprzez opracowanie takiej metodyki przetwarzania obrazów, która pozwoli ograniczyć wpływ zaburzających czynników zewnętrznych na wyniki pomiarów, a także rozszerzyć możliwości wykorzystania obrazów interferometrycznych do opisu przemieszczeń terenu górniczego.

Jako główne czynniki mogące poprawić opis pomiaru przemieszczeń terenu górniczego techniką InSAR Autorka przyjęła: wpływ opóźnienia troposferycznego, dobór wyboru modelu statystycznego w procesie rozwijania fazy interferogramów SAR przy pomiarze przemieszczeń krótkookresowych oraz dobór baz czasowo-przestrzennych przy pomiarze przemieszczeń długookresowych techniką SBAS.

Swoje badania Autorka przeprowadziła na terenach górniczych LGOM, wykorzystując do pomiaru przemieszczeń powierzchni terenu dane z satelitów SAR Sentinel-1 A/B.

W recenzowanej dysertacji poza podaniem celu i zakresu pracy, dość dokładnym opisem teoretycznym dotyczącym powstawania, pomiaru i prognozowania deformacji ciągłych powodowanych podziemną eksploatacją górniczą, omówieniem podstaw i ograniczeń pomiarów techniką InSAR, a także scharakteryzowaniem obszaru badawczego i zaobserwowanych tam wartości obniżeń (zagadnienia te zostały omówione w rozdziałach 1, 2 i 3) można wyróżnić dwa główne nurty tematyczne opisane w rozdziałach 4 i 5:

Pierwszy z nich, dotyczy możliwości redukcji błędów o charakterze systematycznym oraz zmniejszenia rozproszenia wyników pomiaru zjawiska w opracowaniach InSAR wykorzystywanych do pomiaru krótkookresowych obniżeń terenu spowodowanych wstrząsami górniczymi. W tym celu Doktorantka opracowała metodykę przetwarzania danych InSAR polegającą na zastosowaniu poprawki troposferycznej GACOS i przyjęciu odpowiedniego modelu statystycznego w procesie rozwijania fazy interferogramów SAR.

Drugi z nich, polega na opracowaniu takiej metodyki dla pomiarów długookresowych, która zwiększy dokładność i pewność pomiaru techniką InSAR przemieszczeń długookresowych wywołanych prowadzoną eksploatacją górniczą. W opracowanym przez Autorkę algorytmie obliczeń zastosowana została poprawka troposferyczna GACOS oraz wybór bazowego zbioru interferogramów w oparciu o kryterium wartości mediany koherencji poszczególnych interferogramów.

Główne osiągnięcia opiniowanej pracy to:

- Opracowanie metodyki przetwarzania interferogramów w pomiarze techniką InSAR krótkookresowych przemieszczeń powierzchni terenu wywołanych wstrząsami górniczymi.
- Opracowanie metodyki przetwarzania interferogramów w pomiarze techniką InSAR długookresowych przemieszczeń powierzchni terenu spowodowanych prowadzoną eksploatacją górniczą.
- Wskazanie istotności wpływu opóźnienia troposferycznego na pomiar przemieszczeń krótko- i długookresowych metodą krótkich baz oraz wskazanie na poprawkę troposferyczną GACOS jako optymalną do korekcji tego wpływu przy pomiarach wpływów górniczych.
- Wskazanie istotności wyboru modelu statystycznego, w procesie rozwijania fazy interferogramów SAR przy opracowywaniu przemieszczeń wywołanych wstrząsami górniczymi.
- Zbadanie wpływu doboru baz czasowo-przestrzennych na pomiar przemieszczeń długookresowych techniką krótkich baz,
- Otrzymanie rozkładu przemieszczeń pionowych, których charakterystyka jest zgodna z całą z funkcji Gaussa.

Wymienione osiągnięcia opiniowanej pracy świadczą o tym, że Autorka w pełni zrealizowała założone tezy pracy.

Należy podkreślić, że realizacja pracy wymagała od Doktoranta znacznej wiedzy w zakresie matematyki i informatyki, a także w zakresie pomiarów techniką InSAR i ich opracowywania. Wykonane przez Doktorantkę badania umożliwią zwiększenie pewności

i dokładności pomiarów techniką InSAR przemieszczeń wywołanych eksploatacją górnictwem co pozwoli na szersze wykorzystanie takich pomiarów do monitoringu terenów górniczych i pogórnich.

Zdaniem recenzenta podstawowymi wadami merytorycznymi rozprawy (oprócz podanych przy opisie jej treści) są:

- brak powiązania pomiędzy obserwowanymi techniką InSAR obniżeniami a prowadzoną w okresie pomiarowym eksploatacją górnictwem,
- osiągnięcie w postaci otrzymania rozkładu przemieszczeń pionowych, których charakterystyka jest zgodna z całą z funkcji Gaussa jest znaczące, gdyż pokazuje, że metoda ma potencjał zastosowania w pomiarach obniżen. Rozważania na temat jakościowej i ilościowej zbieżności z prawdziwym procesem deformacji górniczych wymaga odniesienia do obserwacji przeprowadzonymi klasycznymi metodami geodezyjnymi na zastabilizowanych punktach pomiarowych lub przynajmniej do wyników prognozy wpływów,
- przedstawiona metodologia opracowania pomiarów InSAR jest prawidłowa, jednak należy zwrócić uwagę, że nie zostało do końca wyjaśnione dlaczego Autorka podjęła się takiej a nie innej ścieżki postępowania. Dlaczego odrzucono technikę PSI? Tereny objęte wpływami górniczymi bywają bardzo zróżnicowane – od terenów silnie zurbanizowanych po tereny rolne,
- w rozprawie nie zamieszczono opisu wyników dotychczasowych badań nad wpływem wstrząsów górniczych na obniżenia powierzchni terenu i wyrobisk podziemnych,
- powinny być zamieszczone w dysertacji mapy eksploatacji dokonanej i aktualnie prowadzonej z charakterystyką geologiczno-górnictwem eksploatacji, położeniem epicentrow analizowanych w pracy wstrząsów i zaznaczonymi obszarami niecek wpływów długookresowych poddanych ocenie,
- w podsumowaniu i w kilku miejscach pracy pojawia się określenie typu "Niewątpliwą zaletą pomiarów przemieszczeń powierzchni terenu z wykorzystaniem technik InSAR jest łatwy dostęp do danych, które cechują się wysoką rozdzielczością czasową i dużym zakresem przestrzennym" – nie wiem czy pojęcie wysoka rozdzielczość i duży zakres przestrzenny jest właściwe? Może lepiej byłoby zastosować pojęcie „wystarczające z uwagi na przedmiotowe zadanie”.
- należałoby konsekwentnie pisać, o przemieszczeniach poziomych, pionowych lub LOS, a nie tylko o przemieszczeniach, bo to nie jest jednoznaczne.

W pracy występują także nieliczne błędy stylistyczne i interpunkcyjne, a także związane z formatowaniem treści.

Przedstawione w recenzji uwagi krytyczne nie przesądzają o wartości merytorycznej pracy. Mają one jedynie charakter sugestii dla Autorki przy realizacji dalszych prac badawczych nad zagadnieniami poruszonymi w dysertacji, które cechują się znacznym potencjałem dalszego rozwoju.

4. Wniosek końcowy

Autorka wykazała, że **posiadła umiejętność samodzielnego rozwiązania złożonego zadania badawczego** planując i konsekwentnie realizując wiele różnorodnych badań i analiz. W procesie tym **rozwiązała konkretny problem naukowy** o charakterze poznawczym i praktycznym, mieszczący się w dyscyplinie naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Jej **oryginalnym osiągnięciem naukowym** jest opracowanie metodyki przetwarzania danych interferometrycznych w aspekcie oddziaływania eksploatacji górniczej na powierzchnie terenu. Osiągnięcie to **mieści się w zakresie dyscypliny naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka** i może znaleźć w przyszłości zastosowanie praktyczne.

Doktorantka **wykazała się wystarczającą wiedzą teoretyczną i praktycznymi umiejętnościami samodzielnego prowadzenia badań naukowych** spełniając tym samym formalne wymagania stawiane rozprawom doktorskim. W związku z tym, zgodnie z art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14.03.2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym ... (Dz. U. z 2017 r. poz. 1789) w związku z art. 179 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. – Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r, poz. 1669, z późn. zm.) wnoszę do Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie mgr inż. Anny Kopeć do dalszego trybu postępowania w przewodzie doktorskim, określonego przez Ustawę.

