

Katowice, 19.05.2021r.

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

Recenzja

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Bartosza Owoc na temat: „*Analiza niepewności tomografii sejsmicznej w różnych skalach eksperymentów sejsmicznych*”

Podstawa i przedmiot recenzji

Podstawą wykonania recenzji była uchwała Rady Naukowej Instytutu Geofizyki Polskiej Akademii Nauk o nr. 7/257/2021, podjęta na posiedzeniu w dniu 12 marca 2021 roku. Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Bartosza Owoc na temat: „*Analiza niepewności tomografii sejsmicznej w różnych skalach eksperymentów sejsmicznych*”. Promotorem pracy jest dr hab. Mariusz Majdański, prof. PAN.

Struktura rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska przedstawiona została w formie monografii w języku angielskim, a oryginalny tytuł rozprawy jest następujący "*Analysis of the uncertainty of travelttime tomography in various scales of seismic experiments*". Do monografii dołączone zostało również streszczenie w języku polskim. Rozprawa składa się z czterech rozdziałów, przy czym po wprowadzeniu następuje rozbudowany rozdział 2, opisujący metodykę pomiarów sejsmicznych, interpretację fal sejsmicznych, tomografię sejsmiczną opartą na pierwszych wejściach fali sejsmicznej (FATT) oraz wspólnej inwersji fal refrakcyjnych i odbitych (*joint refraction and reflection inversion*), analizy niepewności, w tym opracowanej przez doktoranta autorskiej metody analizy niepewności. Kolejny rozbudowany rozdział 3 zawiera opisy wprowadzenia autorskich metod analizy niepewności dla trzech eksperymentów wykonanych w różnej skali pomiarów. Rozdział czwarty to podsumowanie uzyskanych wyników badań.

Praca napisana jest przejrzysto i jest bardzo starannie wykonana. Objętość pracy to 113 stron, w tym 43 rysunki i 5 tabel. Zamieszczona literatura wyczerpuje niezbędne informacje i wyniki badań w zakresie poruszanej w rozprawie tematyki. Należy z uznaniem podkreślić, że w spisie literatury znajduje się kilka wartościowych

pozycji, w których doktorant jest współautorem, publikowanych w czasopismach z *impact factor* lub na międzynarodowych konferencjach.

Ocena oryginalności problemu badawczego

W rozprawie doktorskiej doktorant podjął się badania bardzo istotnego zagadnienia, jakim jest analiza niepewności oraz analiza błędów tomograficznego odwzorowania pola prędkości, obliczanego z czasów pierwszych wejść fali sejsmicznej (FATT). Każda metoda pomiarowa ma swoje ograniczenia, przez co jej wyniki nie są całkowicie precyzyjne i są obarczone błędami. Dlatego każda inicjatywa badawcza w celu udoskonalenia oceny niepewności lub błędów prędkości, w ujęciu zarówno ilościowym jak i jakościowym jest niezmiernie pożądana. Doktorant określił naukowy i użyteczny cel rozprawy doktorskiej, który odnosi się do "uzyskania dokładniejszych i bardziej realistycznych wyników dzięki zastosowaniu analizy niepewności w eksperymentach sejsmicznych w różnych skalach". Analizy niepewności zbiorów wyników w przypadkach o różnych skalach pomiarów, przeprowadził uwzględniając dwa czynniki wpływające na niepewność metody FATT, tj. wpływ modelu startowego i dokładności wyznaczenia czasu wejścia fali (tzw. pikowania). W tym celu wprowadził estymator dopasowania modelu (tzw. *model-fitting estimator*). Ponadto w celu realizacji obliczeń estymatora dopasowania modelu opracował prostą, ale skuteczną i mało obciążającą obliczeniowo metodę wyznaczenia niepewności wyników uzyskanych z FATT od modelu wyjściowego. Jako startowy model prędkości do obliczania inwersji zastosował prosty model gradientowy 1D, co okazało się praktycznym rozwiązaniem. Wprowadził również rozwiązania techniczne i organizacyjne, które sprawiają, że pomiary polowe są łatwiejsze i szybsze do wykonania oraz zmniejszają możliwość popełnienia błędów przy geometrii rozstawów i w efekcie analizie tras sejsmicznych. W części odnoszącej się do interpretacji danych sejsmicznych, rozwiązania opracowane przez doktoranta zostały przetestowane w praktyce na modelach w różnej skali. W przypadku modelu regionalnego, estymatory zostały również przetestowane na modelu numerycznym.

Wszystkie opisane wyżej problemy badawcze są oryginalne. Podobnie oryginalne są też modyfikacje wprowadzone w organizacji prac polowych.

Ocena rozprawy doktorskiej

Do przeprowadzenia analizy niepewności wyników pomiarów sejsmicznych, doktorant opracował autorskie rozwiązania normalizujące błędy odchylenia standardowego prędkości do najlepiej dopasowanej prędkości propagacji fal, wyznaczonej dla określonego poligonu pomiarowego (równanie 15), które posłużyło jako pierwsze przybliżenie estymatora niepewności - błędu. Aby usunąć niefizyczne artefakty wynikające ze słabego pokrycia promieniami w niektórych komórkach siatki

modelu pola prędkości, uzyskaną wartość (równanie 15), normalizowano liczbą promieni z każdej odpowiedniej komórki równanie (16), w celu uzyskania jakościowego estymatora niepewności ϵ . Do zbadania zależności FATT od precyzji wyznaczania czasów pierwszych wejść fali (dokładności pikowania sejsmogramów), doktorant zastosował metodę Monte Carlo. Analiza niepewności opracowana przez doktoranta okazała się uniwersalna, gdyż można ją z powodzeniem stosować we wszystkich skalach eksperymentów sejsmicznych, od przypowierzchniowych po regionalne. Niewątpliwie opracowanie autorskich estymatorów niepewności jest oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego.

Swoje autorskie rozwiązania przetestował w trakcie badania struktur litosfery w trzech różnych skalach z wykorzystaniem tomografii czasów przebiegu fal sejsmicznych, głównie fal refrakcyjnych Pn. Te trzy eksperymenty pomiarowe to: pomiar w warstwach przypowierzchniowych na profilach sejsmicznych w pobliżu Chęcina, eksperyment przemysłowy (wykonany przy okazji pomiarów JURASHALE), oraz wybrany profil z regionalnego eksperymentu SUDETES 2003.

Z badań przeprowadzonych przez doktoranta wynika, że w przypadku pomiarów w najmniejszej skali, tj. pomiarów w warstwach przypowierzchniowych, największy wpływ na rozkład prędkości fal miał początkowy model prędkości, natomiast czasy wejść fal sejsmicznych były bardzo wyraźne i nie miały istotnego wpływu na błędy i na estymację niepewności. Z kolei w przypadku badań przemysłowych, zarówno startowy model prędkości jak również dokładność wyznaczania czasów pierwszych wejść fali, miały porównywalny wpływ na inwersję danych sejsmicznych

Najbardziej rozbudowaną interpretację doktorant przeprowadził dla modelu regionalnego w Sudetach. Opracowany uogólniony, dwuwymiarowy model skorupy i górnego płaszcza z modelu regionalnego, rzuca nowe światło na głębokie struktury geologiczne, jednocześnie ujawnia nowe szczegóły i częściowo potwierdza wcześniejsze interpretacje. W płytkiej warstwie tego modelu doktorant wyodrębnił stosunkowo małe struktury i uzyskał bardziej szczegółową granicę Moho, dzięki zastosowanej inwersji FATT z wykorzystaniem czasów przebiegu fal Pn (fal refrakcyjnych na granicy Moho). Zaadoptował i zastosował techniki przetwarzania dla fal odbitych, do bardzo nieregularnych zestawów danych w skali regionalnej na profilu SO2, aby zwiększyć widoczność fal refrakcyjnych, Pn. Wykorzystując techniki wzmacniania sygnałów, doktorant określił znacznie więcej czasów wejść fal Pn. Uzyskał przez to dokładniejszą wartość prędkości fal sejsmicznych górnego płaszcza ziemi pod Sudetami. Ze względu na dużą nieregularność danych niskiej jakości, wpływ czasów uzyskanych z pikowania wejść fali na sejsmogramach, ma istotne znaczenie dla wyników tomografii FATT w skali regionalnej.

Przedstawione mapy niepewności, a zwłaszcza wyniki testów syntetycznych, potwierdzają, że autorska metoda analizy niepewności działa skutecznie, dając

poprawnie oszacowane niepewności, zarówno jakościowe, jak i ilościowe. Obliczenia FATT dały relatywnie słaby wynik rozkładu prędkości fali w pierwszej warstwie. Przy czym odwzorowanie z fazy fal **Pn** jest lepsze niż z faz **Pg** (fale refrakcyjne od podłoża) i **PmP** (fale odbite od granicy Moho). Zobrazowanie obliczone metodą *joint inversion* z trzech ww. grup fal, okazało się najlepszą rekonstrukcją modelowego pola prędkości. Dzięki testom syntetycznym doktorant potwierdził, że na profilu SO2 z eksperymentu SUDETES 2003, granica Moho jest prawidłowo wyznaczona, chociaż oszacował znaczne niepewności w jej bezpośrednim sąsiedztwie.

Doktorant wykazał się dużą docieklivością przy interpretowaniu tomograficznych obrazów prędkości propagacji fal, i umiejętnie potrafił zastosować znane rozwiązania z przetwarzania sygnałów, do nietypowych dla nich zagadnień. Należy jednak zwrócić uwagę, że interpretacja komplikuje się dla nieregularnych struktur geologicznych, odbiegających od prostego modelu warstwowego i nawet przy bardzo dobrym pokryciu obszaru promieniami sejsmicznymi możemy popełniać istotne błędy interpretacyjne.

Recenzent nie wnosi uwag krytycznych do zawartości treści merytorycznej rozprawy, które miałyby fundamentalne znaczenie dla jej oceny. Z punktu widzenia recenzenta, w dysertacji brakuje jednak szerszego opisu przykładów inwersji pola prędkości dla różnych numerycznych modeli geologicznych z wprowadzonymi anomaliami prędkości, odzwierciedlającymi skomplikowaną budowę geologiczną. Taka analiza przypadków na podstawie literatury i/lub własnych badań modelowania numerycznego, pozwoliłaby na pokazanie złożoności i niepewności procedur interpretacyjnych, w tym na zachowanie się autorskich estymatorów niepewności w skomplikowanych strukturach geologicznych.

Zwracam również uwagę, że autorskie estymatory dopasowania modelu według wzorów (15) i (16) są bezwymiarowe $\{\text{error} = \sigma / v_{b.f.} \text{ oraz } e = (\sigma / v_{b.f.}) \cdot (N_{\max} / N_{\text{rays}})\}$. Doktorant w rozprawie analizuje je jako wartości w procentach. W takim ujęciu wzory powinny być nieco zmodyfikowane, podobnie do anomalii sejsmicznych podawanych w procentach.

Ponadto z formalnego punktu widzenia, należy wspomnieć o braku w spisie literatury niektórych powołań występujących w tekście, np. Guterch et al. 1988; Souriau and Veinante 1975.

Ogólna ocena dysertacji

Niewątpliwie rozprawa doktorska Pana mgr inż. Bartosza Owoc wnosi nowe elementy do zagadnienia oceny niepewności wyznaczonego pola prędkości propagacji fal sejsmicznych metodą tomografii FATT. Opracowane przez doktoranta rozwiązania mogą być z powodzeniem wykorzystywane w codziennej praktyce prowadzonych

badania sejsmicznych. Odpowiadając na pytania ustawowe stwierdzam, że zaproponowane w pracy rozwiązania stanowią oryginalne rozwiązania problemu naukowego. Doktorant wykazał się szeroką wiedzą merytoryczną. Pokazał, że potrafi odpowiednio zaplanować badania, zaproponował nowe rozwiązania do organizacji sejsmicznych prac terenowych, wprowadził nową metodę analizy niepewności wyników tomografii prędkościowej, odpowiednio dobrał metody analizy sygnałów sejsmicznych, a niektóre sam rozwinął. Ponadto udowodnił, że potrafi odpowiednio interpretować dane sejsmiczne z terenowych kampanii pomiarowych oraz wyciągać właściwe wnioski. W ten sposób udowodnił, że posiada umiejętności potrzebne do prowadzenia badań naukowych.

Wnioski końcowe

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska pt. „*Analiza niepewności tomografii sejsmicznej w różnych skalach eksperymentów sejsmicznych*” jest oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego i świadczy dostatecznie o ogólnej wiedzy teoretycznej kandydata w zakresie dziedziny nauk ścisłych i przyrodniczych oraz w dyscyplinie nauki o Ziemi i środowisku, a także o umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Uwzględniając powyższe stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Bartosza Owoc, spełnia warunki określone w art. 13, ustęp 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595) i w Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. 2018. Poz. 218) i wnoszę, aby Rada Naukowa Instytutu Geofizyki Polskiej Akademii Nauk dopuściła Pana mgr inż. Bartosza Owoc do dalszych etapów postępowania w przewodzie doktorskim.

badania sejsmicznych. Odpowiadając na pytania ustawowe stwierdzam, że zaproponowane w pracy rozwiązania stanowią oryginalne rozwiązania problemu naukowego. Doktorant wykazał się szeroką wiedzą merytoryczną. Pokazał, że potrafi odpowiednio zaplanować badania, zaproponował nowe rozwiązania do organizacji sejsmicznych prac terenowych, wprowadził nową metodę analizy niepewności wyników tomografii prędkościowej, odpowiednio dobrał metody analizy sygnałów sejsmicznych, a niektóre sam rozwinął. Ponadto udowodnił, że potrafi odpowiednio interpretować dane sejsmiczne z terenowych kampanii pomiarowych oraz wyciągać właściwe wnioski. W ten sposób udowodnił, że posiada umiejętności potrzebne do prowadzenia badań naukowych.

Wnioski końcowe

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska pt. „*Analiza niepewności tomografii sejsmicznej w różnych skalach eksperymentów sejsmicznych*” jest oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego i świadczy dostatecznie o ogólnej wiedzy teoretycznej kandydata w zakresie dziedziny nauk ścisłych i przyrodniczych oraz w dyscyplinie nauki o Ziemi i środowisku, a także o umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Uwzględniając powyższe stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Bartosza Owoc, spełnia warunki określone w art. 13, ustęp 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595) i w Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. 2018. Poz. 218) i wnoszę, aby Rada Naukowa Instytutu Geofizyki Polskiej Akademii Nauk dopuściła Pana mgr inż. Bartosza Owoc do dalszych etapów postępowania w przewodzie doktorskim.

Biorąc pod uwagę wprowadzenie nowych autorskich metod oceny niepewności wyników tomografii prędkościowej FATT i ich znaczenie praktyczne udokumentowane na rzeczywistych danych pomiarowych w różnej skali oraz osiągnięcie założonych celów dysertacji stosując te autorskie rozwiązania, wnoszę do Rady Naukowej propozycję wyróżnienia pracy mgr inż. Bartosza Owoc.

