

Warszawa, 14.11.2019

dr hab. Mariusz Majdański, prof. PAN  
Instytut Geofizyki PAN  
ul. Księcia Janusza 64  
01-452 Warszawa  
email: mmajd@igf.edu.pl

### **Recenzja rozprawy doktorskiej**

**Pana mgr inż. Grzegorza Rasia zatytułowanej**

**„Inwersja pełnego pola falowego (FWI) jako niekonwencjonalne narzędzie modelowania sejsmicznego na podstawie wybranych przykładów budowy modelu prędkości w obrębie basenu arakańskiego”**

Recenzowana rozprawa doktorska wykonana została pod kierunkiem dr hab. inż. Jerzego Deca na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. Recenzowana rozprawa została skierowana do poprawy, a poniższa ponowna recenzja została przygotowana na zlecenie Dziekana tego Wydziału prof. dr hab inż. Jacka Matyszkiewicza z dnia 11.10.2019 roku (WGGiOŚ-dz.0154-356/2019).

#### **Problem badawczy**

Głównym celem pracy jest przedstawienie nowoczesnego modelowania sejsmicznego w formie inwersji pełnego pola falowego i jego wpływu na obrazowanie danych sejsmicznych dla celów kompleksowej i szczegółowej interpretacji sejsmogeologicznej. Problematyka pracy dotyczy zaawansowanych metod budowy modelu prędkości ze złożoną anizotropią. Całość zobrazowana jest na przykładzie wyspecjalizowanych danych morskich z obszaru Basenu Arakańskiego uzyskanych przy użyciu najnowocześniejszych technik przemysłowych.

Z dużym zainteresowaniem podjąłem się recenzji tej pracy ponieważ opisuje ona najnowocześniejsze techniki modelowania sejsmicznego (przybliżenie FWI) i wykorzystuje bardzo dokładne i kosztowne dane uzyskane z najbardziej zaawansowanych morskich systemów pomiarowych. Dostęp do takich rozwiązań jest dla Polskich naukowców bardzo ograniczony, a sfinansowanie tego typu badań w Polskich realiach naukowych jest wręcz niemożliwe. Dodatkowo obszar badań cechuje się skomplikowaną geologią, trudną do zobrazowania przy pomocy konwencjonalnych narzędzi.

#### **Struktura rozprawy**

Praca zawiera 186 stron, 118 często złożonych rysunków i 4 tabele. Podzielona jest na 9 rozdziałów o standardowej, czytelnej strukturze. Całość napisana jest w sposób prosty i zrozumiały. Pierwsze 40

stron nie ma ani jednej literówki, w dalszej części pracy zdarzają się pojedyncze drobne błędy. Nowa wersja rozprawy ma nieco zmienioną strukturę, znaczna część błędów jak i problemów z tłumaczeniem wyrażenia angielskich została poprawiona. W rozprawie nadal jest spora liczba drobnych błędów nie zaburzających odbioru merytorycznego całej pracy, która jest dodatkowo bardzo dobrze złożona. Praca jest bogato ilustrowana, choć rozdział 6 omawiający wyniki przetwarzania przedstawia głównie zrzuty ekranowe z komercyjnych programów, które nie spełniają wymogów publikacyjnych (opisy współrzędnych czy skal kolorów są zupełnie nieczytelne).

**Rozdział 1** to krótki, trzy stronicowy wstęp, który przedstawia motywację do podjęcia pracy badawczej i przedstawia strukturę pracy. W poprawionej wersji rozprawy cel pracy jest dobrze określony pojedynczym, bardzo rozbudowanym zdaniem jako: „**budowa wysokorozdzielczego modelu prędkościowego i uchwycenie płytkich, niewielkich anomalii prędkości za pomocą niekonwencjonalnej technologii inwersji pełnego pola falowego oraz opracowanie metodyki FWI w precyzyjnym obrazowaniu sejsmicznym, redukującym niepewność wstępnej i szczegółowej interpretacji sejsmogeologicznej, na podstawie osadów pochodzących ze spływu grawitacyjnego (elementów masowego transportu) na krawędzi szelfu kontynentalnego w basenie arakańskim**”. Dodatkowo wstęp definiuje również trzy jasno określone hipotezy badawcze, na które autor stara się odpowiedzieć.

**Rozdział 2** to ogólne wprowadzenie do technik inwersji pełnego pola oraz opis podstaw fizyki fal. W zasadzie rozdział ten jest niepotrzebny. Część wprowadzająca FWI powinna być we wstępie (lub w rozdziale 3), a podstawy fizyki fal niewiele wnoszą do pracy, która skupia się na skomplikowanych procesach inwersji dużych nieliniowych problemów.

**Rozdział 3** to bardzo ważny rozdział, który czytałem z dużym zaciekawieniem. Autor podjął się rzeczy niezwykle trudnej, czyli opisu elementów teorii inwersji, problemu inwersji liniowej, problemu linearyzacji inwersji sejsmicznej, algorytmu FWI oraz pewnych przybliżeń i optymalizacji tych problemów. Tematyka ta jest bardzo rozległa i mógłbym ją porównać do kilku książek: „Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory” Menke (1984), „Inverse Problem Theory” Tarantola (2005), „A breviary of Seismic Tomography” Nolet (2008). Autor starał się opisać wszystko na 40 stronach w formie przeglądu. Dla osoby znającej tę tematykę jest to rzeczywiście ciekawe, ale takie hasłowe opisanie szerokiej tematyki nie jest dobrym wprowadzeniem dla nowej osoby, czego spodziewałbym się po doktoracie. Dodatkowo autor zdecydował się na pracę w języku polskim, co jest dużym wyzwaniem.

W rozdziale 3 jest więcej literówek i błędów w stosunku do poprzednich rozdziałów. Na str. 60 „...operator modelujący jest niższego rzędu niż liczba **punktów**, które chce się rozwiązać”. Rozumiem, że chodził o parametry nie punkty? Na str. 65 i 68 mamy „**metody szukania linii**”, których zupełnie nie rozumiem. Chodzi o metody gradientowe, o których autor wspomina na str. 70?

Domyślałem się, że opis pewnych przybliżeń i optymalizacji został wybrany i uwzględniony w tym rozdziale, ponieważ techniki te są uwzględnione w programach używanych w dalszej części pracy, ale nie zostało to opisane.

W podsumowaniu rozdziału 3 pojawia się mało precyzyjne, za to bardzo długie zdanie „**Dla potrzeb tej pracy, głównymi technikami wykorzystanymi do wykonanych obliczeń zastosowałem przede**

wszystkim metody gradientowe opisane aproksymacją Borna, a także pewną jej modyfikację, polegającą na stosowaniu różnych, zmiennych funkcji wagowych do modyfikowanego modelu”.

**Rozdział 4** to opis obszaru badań czyli wybrzeży Birmy, w tym dokładny opis geologii Basenu Arakańskiego, stratygrafii i ewolucji geologicznej obszaru. W poprawionej wersji pracy wszystkie rysunki są poprawnie referowane.

**Rozdział 5** to opis systemów akwizycji danych w tym zaawansowanego systemu Geostreamer, opis prac pomiarowych oraz wstępny processing danych sejsmicznych. Rozdział przedstawia dokładną analizę szumów wraz z optymalnym processingiem do ich usunięcia. Opisana w szczególności jest również sekwencja przetwarzania sejsmicznego użyta do analizy danych refleksyjnych. Wszystkie użyte techniki i metody są standardowe i dobrze znane, włącznie z techniką separacji pól na energię poruszającą się w górę i w dół. Omawiane zdjęcie sejsmiczne uzyskane w niezwykle skomplikowanym systemie 3D i z ogromnym woluminem danych (1 miesiąc pomiarów streamerem 3D) z pewnością nie mogło być przetworzonych przez jedną osobę. W rozdziale tym brakuje określenia wkładu autora w ten proces, choć na str. 99 pojawia się ciekawe zdanie „**Zebrane dane sejsmiczne zostały poddane procedurom wstępnego przetwarzania w trakcie wykonywania pomiaru sejsmicznego i nie podlegają merytorycznej części wykonanej pracy**”, z którego wnioskuję że autor nie brał udziału w zbieraniu danych ani w ich wstępnym przetwarzaniu. W poprawionej wersji pracy zniknął cały rozdział z dokładną informacją o systemie Geostreamer używanym do akwizycji. Dlaczego?

W całym processingu brakuje mi usuwania multipli (wielokrotne odbicia w wodzie). Skoro głębokość wody w jednej części profilu to 200 m a w drugiej 2000 m, to efekt multipli szczególnie w płytkim obszarze musi być znaczący. W pracy nie jest opisane czy procedura FWI zakłada uwzględnienie multipli w modelowaniu. Jest natomiast fragment dyskusyjny uwzględnienie efektów ghost.

**Rozdział 6** to główna część pracy przedstawiająca proces określenia oraz weryfikacji pola falowego dla modelu uzyskanego metodą FWI. Ta część pracy zawiera najwięcej rysunków, które są zrzutami ekranowymi z komercyjnego oprogramowania. Na żadnym z tych rysunków nie da się odczytać osi, opisu skali barw i niektórych parametrów. Z pewnością rysunki te nie mogłyby być opublikowane w żadnym dobrym wydawnictwie naukowym. Pomimo tego rysunki te przedstawiają bardzo dobre wyniki z rozdzielczością modelu prędkości, który jest nieosiągalny w konwencjonalnych technikach.

Na początku rozdziału 6 pojawia się bardzo długie zdanie składające się z 56 słów. Taki styl pisania jest dosyć trudny do interpretacji. Na str. 109 znajduje się rysunek bez podpisu i numeru.

Podrozdział 6.2 opisuje bardzo dokładnie procedurę testowania parametrów do FWI. Domyślam się że jest to największy wkład autora w całą procedurę dlatego jest ona tak obszernie opisana. Także w tym podrozdziale autor prezentuje cele szczegółowe czy też zadania pracy.

Ryc 6.2.1.2 przedstawia porównanie sygnału modelowanego z danymi obserwowanymi. Dopasowanie fazy jest bardzo słabe dla offsetu 6 km, a w tekście pojawia się fragment „dopasowanie zostało wykonane na rekordzie, dla którego model jest dokładny i nieskomplikowany, dlatego dopasowanie jest względnie dobre już na samym początku”. Czy to jest efekt kierunkowości źródła (wyrażonej zmiany sygnatury z kątem obserwacji)?

Ryc 6.4.1.2 pokazuje niezwykle detaliczne pole prędkości, które pasuje do obrazu sejsmicznego. Niestety kolejne obrazy są trudne do analizy, ponieważ zmiany w obrazowaniu są niewielkie i bez

przełączania obrazów na ekranie trudno jest dostrzec różnicę. Szkoda, że wyniki dla poszczególnych częstości 4, 8 i 14 Hz są przedstawione tylko dla jednej linii. Prezentacja taka najlepiej pokazuje możliwości FWI.

Ryc 6.4.2.11 i kolejne pokazują w końcu realną poprawę dla modeli po inwersji FWI. Na rysunkach tych również widać, że modelowane były tylko pierwsze wstąpienia i wybrany przedział ok 200 ms (ciężko określić bo skala jest nieczytelna).

W stosunku do pierwszej wersji rozprawy rozdział 6 został najmocniej zmieniony. Wcześniejsze konkluzje przedstawione w punktach zostały dokładnie opisane.

**Rozdział 7** jest krótkim podsumowaniem powtarzającym obserwację wypunktowane w rozdziałach 2-6.

**Rozdział 8** to wnioski końcowe. Całość jest spójna, choć część wniosków jest trywialna i ogólnie znana.

W **rozdziale 9** Autor prezentuje potencjalne kierunki rozwoju opisywanej metody i trafnie opisuje problemy które należy rozwiązać w dalszych pracach.

W referencjach po poprawie pracy pojawiły się sugerowane przeze mnie publikację Ani Adamczyk i Andrzeja Górszczyka niestety podane bez współautorów.

### **Krytyczne i dyskusyjne uwagi dotyczące rozprawy**

Pomimo poprawy pracy która znacząco zmniejszyła liczbę błędów i drobnych literówek nadal można takie znaleźć. Szczególnie trudne w odbiorze są ryciny nie spełniające wymogów publikacyjnych. Wady te wpływają na odbiór pracy, ale nie przeszkadzają w jej merytorycznym zrozumieniu, szczególnie dla osoby która zna tą tematykę.

Mam jednak kilka drobnych pytań i jedno ważne zastrzeżenie, którego wyjaśnienie jest niezbędne do formalnego wypełnienia wymagań ustawowych do otrzymania stopnia doktora.

- 1) Opisany eksperyment oprócz bardzo dużych nakładów finansowych wymagał zaangażowania wielu osób (akwizycja danych 3D, przetwarzanie konwencjonalne 3D, modelowanie FWI). Z treści pracy nie da się jasno określić wkładu autora w opisywane osiągnięcie. Proszę o jasne, najlepiej udokumentowane, określenie wkładu autora w poszczególne etapy pracy opisanej w rozprawie. Bez tego praca nie spełnia wymogów ustawowych do otrzymania stopnia doktora. Pomimo prób nie znalazłem żadnego artykułu naukowego autora z list ministerialnych. Dlaczego tak dobre wyniki nie zostały opublikowane skoro zostały udostępnione do przygotowania doktoratu?
- 2) Z końcowych wyników analizy FWI wyraźnie widać, że skutecznie modelowane są pierwsze wejścia fal refrakcyjnych. Jest to akustyczne przybliżenie modelowania pełnego pola falowego w ograniczonym, wąskim oknie czasowym. Jak dokładnie przybliżenia zostały zastosowane w prezentowanej analizie FWI.

- 3) W pracy dosyć szczerkowo opisany jest proces uzyskania pola prędkości do migracji. Jest to skomplikowane pole prędkości z anizotropią typu VTI. Jaki jest wg autora wpływ zamrożenia parametrów anizotropii (uzyskanych z nieznaną dokładnością) i inwersja wartości prędkości fal podłużnych w analizie typu FWI?
- 4) Część omawianego profilu znajdowała się na bardzo płytkim morzu (200m). Dlaczego w pracy nie poruszany jest problem wielokrotnych odbić (multipli)? Ich wpływ na obrazowanie musiał być znaczący i z pewnością usuwanie multipli było przeprowadzone w konwencjonalnym obrazowaniu.

### **Wniosek końcowy**

Recenzowana rozprawa przedstawia niezwykle zaawansowany eksperyment oraz najnowocześniejsze znane metody analizy danych sejsmicznych, a poprawiona wersja wyeliminowała znaczną część większych i mniejszych błędów. Wierząc, że autor podczas obrony publicznej wyjaśni wątpliwości co do spełnienia wymagań formalnych oświadczam, że recenzowana praca spełnia warunki określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65 poz. 595) z późniejszymi zmianami w brzmieniu z dnia 15 września 2017 r. (Dz. U. 2017 r. poz. 1789.), zgodnie z Art. 175. 1. ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 poz. 1669).

Jednocześnie, stawiam wniosek do Wysokiej Rady Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie o dopuszczenie mgr. inż. Grzegorza Rasia do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia naukowego doktora.

