

SEKRETARIAT NALKÓWY INSTYTUT GEOFIZYKI PAN	
WPLYNĘŁO	
Data: 18.09.2017	
Nr dz. ....	Zaśl. ....
Ref. ....	

Kraków, 17.09.2017

Prof. dr hab. inż. Andrzej Leśniak

Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska  
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. **Andrzeja Górszczyka**

wykonanej w Instytucie Geofizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie pod kierunkiem dra hab. inż. Michała Malinowskiego, prof. PAN

pt. „Application of Discrete Curvelet Transform in enhanced seismic imaging and accurate velocity model building”

### Zawartość dysertacji

Przedstawiona do recenzji dysertacja napisana jest w języku angielskim i powstała w oparciu o sześć publikacji, których współautorem jest doktorant. Trzy z nich to publikacje w czasopiśmie z listy A (Journal of Applied Geophysics i Geophysical Prospecting) a trzy to recenzowane publikacje konferencyjne firmowane przez EAGE i SEG. W wypadku pięciu publikacji doktorant jest pierwszym autorem, w wypadku jednej drugim. W doktoracie zamieszczono spis tych publikacji wraz z notkami o współautorach. Niestety z informacji umieszczonych w doktoracie nie sposób wywnioskować o ilościowym i jakościowym wkładzie współautorów (poza dwoma mniej znaczącymi wyjątkami) w powstanie poszczególnych publikacji. Recenzent zwrócił się w związku z tym do zleceniodawcy recenzji o uzupełnienie przesłanych dokumentów o oświadczenia mówiące o merytorycznym wkładzie (wraz z procentowym udziałem) współautorów poszczególnych publikacji stanowiących podstawę rozprawy doktorskiej, by umożliwić merytoryczną ocenę wkładu poszczególnych osób (w tym doktoranta) do powstałych publikacji, a tym samym sporządzić rzetelną ocenę samego doktoratu jak i dorobku doktoranta. Recenzent stosowne dokumenty otrzymał. Z poświadczeń wynika, że udział procentowy doktoranta w powstaniu publikacji w wypadku pięciu pozycji w których jest pierwszym autorem waha się od 65% do 80%, co pozwala ocenić jego udział w powstaniu publikacji za kluczowy. W wypadku publikacji w której jest drugim autorem jego udział został oszacowany na 20%.

Doktorat składa się ze wstępu, pięciu rozdziałów zasadniczych oraz podsumowania. Na wstępie zamieszczono również spisy tabel, ilustracji oraz zastosowanych skrótów.

We wstępie doktorant prezentuje przedmiot rozprawy oraz motywy jakimi kierował się podejmując badania w zakresie zastosowania transformacji curvelet (lub jak próbując przetłumaczyć niektórzy autorzy – transformacji krzywkowej) do separacji sygnału

użytecznego i szumu. Autor rozprawy omawia zawartość poszczególnych rozdziałów dysertacji wraz ze wskazaniem na publikację/publikacje w oparciu o którą/które dany rozdział powstał.

W rozdziale pierwszym przedstawiono opis teoretyczny transformaty curvelet i możliwości jej zastosowania do redukcji szumów sejsmicznych w oparciu o dekompozycję sekcji czasowej do ciągu współczynników transformaty curvelet i jej rekonstrukcji po zastosowaniu progowania. Przedstawiona w tym rozdziale została ciągła i dyskretna transformacja curvelet wraz z krótką dyskusją ich własności oraz schematów obliczeń. Ponadto dla sekcji syntetycznej zaprezentowano sposób obliczania wielkości sygnału użytecznego do szumu, konsekwentnie używany w całym doktoracie. Zaprezentowane zostały w tym rozdziale pierwsze rezultaty redukcji szumów dla sekcji syntetycznej zaburzonej białym szumem gaussowskim a w drugim przykładzie kolorowym szumem losowym. Przy filtracji używano progowania uzależnionego od skali jak i kąta curveletu. Autor zwraca uwagę (i to jest nowością w zastosowaniach praktycznych) na podniesienie jakości otrzymywanych rezultatów filtracji w wyniku zastosowania różnego poziomu progowania w zależności od skali curveletu.

Warto zaznaczyć, że rozdział ten, mimo iż powstał na podstawie artykułu "Application of curvelet denoising to 2D and 3D seismic data — Practical considerations" zawiera niewystępujące w nim rozdziały poświęcone ściślemu, matematycznemu sformułowaniu transformacji curvelet.

Rozdział drugi rozprawy powstał na podstawie tego samego artykułu co rozdział pierwszy. Autor rozpoczyna prezentację efektywności filtracji opartej na transformacji curvelet ponownie od przykładu syntetycznego. Do testów został wybrany popularny zbiór danych w postaci sekcji czasowej po składaniu Marmousi2 zaburzonej gaussowskim szumem kolorowym o różnej wariancji, normie i zakresie częstotliwości. Autor rozsądnie wybiera po trzy poziomy wymienionych parametrów co w zupełności wystarcza do uchwycenia różnic w wynikach filtracji. Wyniki filtracji są prezentowane zarówno na sekcjach czasowych jak również w postaci uśrednionych widm częstotliwościowych oraz spektrów w dziedzinie F-K podając w każdym wypadku otrzymaną wartość SNR dla przefiltrowanych sekcji. Używane do filtracji parametry są zebrane w odpowiednich tabelach, łącznie z arbitralnie dobieranymi współczynnikami „c”, które były używane do podwyższania lub obniżania progu odcięcia współczynników transformacji curvelet.

Generalny wniosek (dość oczekiwany) z przeprowadzonej analizy można ująć w stwierdzeniu, że efektywność filtracji maleje wraz ze wzrostem amplitudy szumu zaburzającego. Ponadto zaobserwowano, że najgorsze rezultaty w odtworzeniu sekcji czasowej otrzymuje się dla dolnopasmowego szumu zaburzającego.

Doktorant porównuje również wyniki przeprowadzonej przez siebie filtracji krzywkowej z wynikami filtracji F-X. Niestety nie zamieszcza żadnych informacji o powodach użycia tej

metody filtracji, używanych narzędzi informatycznych ani parametrów jakie posłużyły wykonaniu przetwarzania. Po przeprowadzeniu porównania doktorant stwierdza wyższość transformacji curvelet z uwagi na lepsze odtworzenie sygnałów o niskiej energii i mniejszą ilość artefaktów obserwowanych na sekcji po filtracji.

Kolejnym etapem badania możliwości filtracji opartej na dekompozycji krzywkowej było jej wykorzystanie do filtracji rzeczywistych danych 2D (dane po migracji i po składaniu). Doktorant użył trzech różnych sekcji czasowych o różnych zakresach częstotliwościowych, przedstawiających różne struktury podpowierzchniowe (od płaskich granic po uskoki) zaburzone szumami kolorowymi o różnych charakterystykach. Strategia uzyskania optymalnych rezultatów filtracji (maksymalizacji stosunku sygnału do szumu) jaką przyjął doktorant polegała na wykonaniu szeregu prób wyboru progów odcięcia i każdorazowego sprawdzania jakości uzyskanego rezultatu filtracji. Prócz wielkości progów odcięcia dobierano wartości współczynnika „c”. Oceniając rezultaty filtracji w większości wypadków doktorant nie stwierdził istnienia koherencji szumu odfiltrowanego z sekcji czasowej oraz znaczny wzrost poziomu sygnału użytecznego (koherentnego z trasy na trasę) do szumu. Przedstawione wyniki są również zaprezentowane w postaci widm amplitudowych i wykresów F-K dla sekcji wejściowej i sekcji po filtracji. W podsumowaniu jeszcze raz została podkreślona konieczność indywidualnego doboru progów w zależności od skali curveletu oraz jej dużą efektywność w filtracji danych sejsmicznych 2D w postaci sekcji czasowych oraz map częstotliwości.

Rozdział trzeci doktoratu opiera się na artykule „Enhancing 3D post-stack seismic data acquired in hardrock environment using 2D curvelet transform” opublikowanej w *Geophysical Prospecting*. Autor prezentuje użycie dwuwymiarowej transformacji curvelet do filtracji danych sejsmicznych 3D zarejestrowanych w skałach krystalicznych. Transformacja curvelet w odmianie 3D nie jest w tym wypadku stosowana z uwagi, jak twierdzi doktorant, na znaczną złożoność obliczeniową a tym samym czas potrzebny do jej wykonania. Doktorant proponuje wykonywanie filtracji w wersji 2D kolejno na dwuwymiarowych przekrojach kostki 3D tj kolejno na sekcjach inline, crossline i na przekrojach czasowych. Po złożeniu wyników doktorant nie obserwuje niezgodności fazowych oraz nieciągłości w miejscach przecięć poszczególnych sekcji 2D (np. inline i przekroi czasowych). Wartości progowe współczynników są z kolei określane w wyniku arbitralnej procedury, która opiera się głównie na adaptacyjnym dobieraniu progów w zależności od skali curveletu na podstawie widma tras i rozkładu współczynników transformaty curvelet. Niestety w doktoracie moim zdaniem brak klarownego opisu tej procedury co czyni metodę używaną przez jej autora trochę niejasną.

Zaproponowana przez doktoranta procedura jest użyta do trzech zbiorów danych 3D zarejestrowanych na różnych złożach polimetalicznych z Kanady. Dane wcześniej poddano składaniu głębokościowemu w wersji 3D i migracji. Podobnie jak w wypadku danych 2D i tutaj doktorant wykazuje, że używając transformacji curvelet w zaproponowanej przez niego

wersji udało mu się osiągnąć znacznie lepszą redukcję szumów niż w wypadku zastosowania standardowej procedury filtracji F-XY. Niezależnie od dużych różnic w analizowanych sekcjach 3D filtracja curvelet umożliwiła ponad dwukrotny wzrost stosunku sygnału użytecznego do szumu w stosunku do standardowo stosowanej procedury F-XY oraz wydzielenie słabych odbić zakłócających od płytkich struktur. Tym samym umożliwiła separację zakłóceń koherentnych i refleksów od głębokich struktur.

Kolejny rozdział (napisany w oparciu o publikację „Improving depth imaging of legacy seismic data using curvelet-based gather conditioning: A case study from Central Poland”) ilustruje zastosowanie transformacji curvelet w odtworzeniu budowy struktur wgłębnych w oparciu o skonstruowany model prędkości ośrodka (w ramach głębokościowej migracji przed składaniem). Jest ona w tym wypadku realizowana w oparciu o tomografię fal odbitych i wymaga precyzyjnego wydzielenia impulsów odbitych od poszczególnych warstw na sekcjach wspólnych punktów głębokościowych. Doktorant zestawia uzyskane wyniki przetwarzania z rezultatami jakie otrzymał używając metod klasycznych. Analiza dotyczy danych 2D nad wysadami solnymi na Kujawach. Doktorant zaproponował wykorzystanie w niej specjalnie zaprojektowanej w tym celu sekwencji przetwarzania danych, która na etapie poprawiania rozdzielczości zmigrowanych sekcji przed składaniem wykorzystuje transformację curvelet. Zaproponowana procedura wykorzystuje tę transformację w połączeniu ze standardowymi procedurami dekonwolucji F-X, filtracji pasmowej, mieszania tras i innych.

Rezultaty uzyskane z wykorzystaniem zmodyfikowanej procedury przetwarzania zostały porównane z rezultatami uzyskanymi przy użyciu standardowych technik. Zaprezentowane wyniki pozwoliły doktorantowi stwierdzić, że zastosowanie w sekwencji przetwarzania transformacji krzywkowej znacznie poprawia regularność obrazów po składaniu CDP umożliwiając automatyczne pikowanie wstąpień. Umożliwia to budowanie wiarygodnych modeli prędkościowych a tym samym odtworzenie głębokościowej budowy ośrodka geologicznego. Jak podkreśla doktorant, jest to szczególnie istotne w wypadku danych o słabej jakości i niskiej krotności składania.

W ostatnim rozdziale doktorant przedstawia różne zastosowania transformacji krzywkowej, kreując ją na uniwersalne narzędzie do poprawiania rezultatów przetwarzania danych sejsmicznych. Rozdział został przygotowany na podstawie trzech referatów wygłoszonych na wiodących konferencjach branżowych EAGE i SEG.

Zaprezentowana została metoda redukcji fal powierzchniowych z sekcji 3D w badaniach podłoża krystalicznego. Dyskutowany przykład pozwala na pozytywną ocenę efektywności stosowania transformacji curvelet w redukcji silnych zakłóceń koherentnych. W ocenie autorów publikacji metoda ta znacznie przewyższa metody standardowe np. filtrację F-K. Podkreślono również kluczowe znaczenie transformacji curvelet dla podniesienia efektywności tworzenia modeli prędkościowych ośrodka z wykorzystaniem automatycznego pikowania wstąpień.



Kolejnym przykładem zamieszczonym w rozdziale piątym dysertacji jest redukcja szumu sygnałów mikrosejsmicznych zarejestrowanych w trakcie operacji hydraulicznego szczelinowania górotworu. Zaproponowana metoda polega na użyciu wielokanałowej filtracji splotowej a następnie zastosowanie transformacji DCT. Pozwala to na maksymalną redukcję szumów przy minimalnej redukcji sygnałów koherentnych.

Ostatni przykład analizowany w rozprawie dotyczy zastosowania transformacji krzywkowej do wzmocnienia refleksów w danych sejsmicznych o skali regionalnej ukierunkowanych na badanie skorupy ziemskiej. Przetwarzanie zostało wykonane pod kątem realizacji tomografii pierwszych wstąpień oraz w kolejnym etapie inwersji pełnego pola falowego. Korzystano z danych sejsmiki morskiej o długości kilkuset kilometrów. Również w tym wypadku wykorzystanie DCT umożliwiło poprawną identyfikację pierwszych wstąpień i budowę modelu prędkościowego.

Rozprawę kończy krótki rozdział w którym doktorant podsumowuje uzyskane rezultaty oraz kreśli możliwe kierunki dalszego rozwoju metody filtracji opartej na dyskretnej transformacji krzywkowej.

### **Uwagi ogólne**

Forma dysertacji jaką wybrał doktorant jest rzadko spotykana. Nie jest to dysertacja w klasycznym tego słowa znaczeniu, gdyż jak podkreśla autor stanowi dość bezpośrednią kompilację sześciu publikacji i de facto tylko wstęp teoretyczny i podsumowanie są jej nowymi elementami. Nie jest też dopuszczoną w ustawie formą „spójnego tematycznie zbioru artykułów opublikowanych lub przyjętych do druku w czasopismach naukowych”. Recenzent uznał, że ponowna ocena treści merytorycznej artykułów wchodzących w skład doktoratu, które zostały opublikowane w liczących się czasopismach o zasięgu światowym jest nieuzasadniona. Stąd uwagi będą miały siłą rzeczy charakter bardziej ogólny.

Transformacja krzywkowa (ang. curvelet transform) należy do szerokiej klasy wielorozdzielczych transformacji geometrycznych, które wzięły swój początek od analiz czasowo-częstotliwościowych (falka Gabora) i transformacji falkowej (ang. wavelet transform). Doktorant odnosi się w dysertacji do tego faktu, nawiązując krótko do transformacji ridgelet, której to rozwinięcie posłużyło do stworzenia transformacji krzywkowej. Brakuje, zdaniem recenzenta, omówienia przez doktoranta używanej przez niego transformacji w pełnym kontekście transformacji wielkoskalowych, wśród których skądinąd zajmuje poczesne miejsce tej, która doczekała się w ostatniej dekadzie największej ilości zastosowań praktycznych. Zabrakło między innymi choćby krótkiego odniesienia do transformacji wedgelet, bandelets, contourlets lub surfacelets a ostatnio również shearlets i kilku innych. Jest oczywiste, że doktorant w głównej mierze oparł swoją dysertację o zbiór artykułów, bezdyskusyjnie o dużej wartości merytorycznej. Skoro jednak zdecydował się na unieszczenie w doktoracie teoretycznego wstępu to należało odnieść się również do szerszego kontekstu matematycznego, który jest niewątpliwie znany doktorantowi.

Doktorant kreuje transformację curvelet jako uniwersalną metodę redukcji szumów w pierwszej kolejności o losowym charakterze, próbując przekonać, że może mieć ona duże znaczenie w praktyce przemysłowej. Nie umniejszając wysokiej jakości rezultatów uzyskanych przez doktoranta należy zauważyć, że zasadniczy wpływ na ich osiągnięcie ma właściwe (optymalne) ustawienie progów odcięcia dla różnych skal curveletu. Podobnie, gdy celem filtracji jest usunięcie zakłóceń koherentnych (np. fal powierzchniowych) nieodzowne jest ich precyzyjne zidentyfikowanie na sekcji czasowej zarówno w czasie jak i przestrzeni. Niestety pociąga to za sobą konieczność iteracyjnego doboru parametrów odcięcia dla różnych skal i za każdym razem sprawdzanie rezultatów przeprowadzonej filtracji. Czyni to zaproponowaną przez doktoranta procedurę dość czasochłonną i w pewnym stopniu uzależnioną od oceny i doświadczenia interpretatora, gdyż nie zawsze maksymalizacja wartości współczynnika SNR (w formie zaproponowanej przez doktoranta) pozwala na uzyskanie optymalnych rezultatów. Tym samym na jej szersze zastosowanie w praktyce sejsmicznej trzeba jeszcze poczekać.

Inna niejasność pojawia się w związku z twierdzeniem doktoranta, że wykorzystuje transformację w wersji 2D do danych 3D z uwagi na fakt zbyt duże koszty obliczeniowe (nie precyzuje czy chodzi o czas obliczeń czy o wielkość pamięci zaangażowanej do obliczeń), większą liczbę współczynników oraz redundancję. Recenzent nie znalazł w pracy przekonujących argumentów na poparcie tej tezy. Podobnie twierdzenie o zachowaniu ciągłości impulsów na przefiltrowanych przekrojach (podłużnych, poprzecznych i czasowych) na krawędziach ich przecięć opiera się tylko na wizualnej ocenie przeprowadzonej przez doktoranta.

Jako podsumowanie można stwierdzić, że poruszone w doktoracie zagadnienia, sposób ich przedstawienia, wykonane analizy i wyciągnięte wnioski pozwoliły mgra inż. Andrzeja Górszczyka na w miarę kompletną, przemyślaną i pozbawioną większych błędów prezentację założonej w doktoracie tematyki.

#### **Dostrzeżone usterki techniczne:**

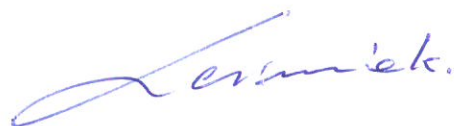
Praca napisana jest praktycznie bez usterek technicznych. Jedyne uwagi to literówka na stronie 106 (trzecia linijka od dołu) i zbyt mała wielkość niektórych rysunków.

#### **Wniosek końcowy**

Podsumowując, zaprezentowana przez mgra inż. Andrzeja Górszczyka dysertacja wnosi dużą wartość udoskonalenie metody sejsmicznej a w szczególności w metody redukcji szumów losowych i koherentnych a tym samym w podniesieniu rozdzielczości sekcji czasowej, stworzeniu warunków do automatycznego wydzielenia granic i umożliwieniu budowy wiarygodnych modeli prędkościowych ośrodka geologicznego.

Praca doktorska udowadnia moim zdaniem, iż mgr inż. Andrzej Górszczyk w sposób wnikliwy wykonał postawione zadanie i mimo, że nie ustrzegł się pewnych niedociągnięć udowodnił swoją biegłość w prezentowanej problematyce naukowej.

Recenzowana rozprawa doktorska w częściach i w zakresie wynikającym z oświadczeń współautorów jest samodzielnym i oryginalnym dziełem autora. Tym samym stwierdzam, że rozprawa doktorska pana mgr inż. Andrzeja Górszczyka pt. „Application of Discrete Curvelet Transform in enhanced seismic imaging and accurate velocity model building” spełnia wymogi określone w Ustawie Prawo o Szkolnictwie Wyższym, Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki z dnia 14 marca 2003 r. i w Rozporządzeniu Ministra NiSW z dnia 10 listopada 2015 r. wnioskuję o dopuszczenie pana mgr inż. Andrzeja Górszczyka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "K. Lesniak".