

Kraków, 27.02.2019

Prof. dr hab. inż. Andrzej Leśniak

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

RECENZJA

rozprawy doktorskiej **mgra Jacka Trojanowskiego**

wykonanej w Instytucie Geofizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie. Promotorem pracy zatytułowanej „Advanced migration and filtration techniques for microseismic data” jest dr hab. inż. Michał Malinowski, prof. PAN zaś promotorem pomocniczym dr Leo Eisner.

Zawartość dysertacji

Przedstawiona do recenzji dysertacja napisana jest w języku angielskim i powstała na bazie dwóch recenzowanych publikacji doktoranta (jednej samodzielnej, drugiej we współautorstwie z promotorem pomocniczym) opublikowanych w Geophysical Prospecting i w Geophysics oraz trzech recenzowanych abstraktów z konferencji EAGE i SEG (również we współpracy z Leo Eisnerem a w jednym wypadku z drem Andrzejem Górszczykiem). Z oświadczeń współautorów dostarczonych recenzentowi wynika, że mgr Jacek Trojanowski był głównym autorem powyższych publikacji.

Doktorat składa się ze wstępu, pięciu rozdziałów zasadniczych oraz podsumowania. Na końcu dysertacji zamieszczono również spis tabel oraz spis ilustracji oraz bibliografię (co dziwne fakt jej umieszczenia pominięto w spisie treści).

Zasadniczym przedmiotem rozprawy jest opracowanie skutecznych metod detekcji i lokalizacji zjawisk mikrosejsmicznych rejestrowanych siecią czujników powierzchniowych w obecności szumu.

We wstępie doktorant definiuje emisję mikrosejsmiczną oraz konfrontuje ze sobą dwie metody jej monitoringu – czujnikami umieszczonymi na powierzchni oraz czujnikami umieszczonymi w odwiercie. Następnie omawia przedmiot rozprawy oraz motywy jakimi kierował się podejmując badania w zakresie zastosowania różnych metod składania (lub jak to nazywa w rozprawie - metod migracyjnych) rejestrowanych tras do detekcji sygnału mikrosejsmicznego występującego w towarzystwie szumów o amplitudzie niejednokrotnie znacznie przewyższającej poziom sygnału. Następnie autor rozprawy omawia zawartość poszczególnych rozdziałów dysertacji wraz ze wskazaniem na publikację/publikacje w oparciu o którą/które dany rozdział powstał.

W rozdziale pierwszym omówiono podstawy teoretyczne metod migracyjnych używanych do detekcji i lokalizacji wstrząsów mikrosejsmicznych. Doktorant prezentuje tam metody wykorzystujące tzw. funkcję detekcji, która jest szeregiem czasowym maksimum funkcji obrazu będącą zbiorem tras po operacji składania dla założonych lokalizacji źródeł. W dysertacji opisano statystyczne właściwości funkcji detekcji oraz zdefiniowano probabilistyczne kryterium detekcji słabych sygnałów sejsmicznych. Wyniki te zostały zawarte w rozdziale 1.2 dysertacji, który jest de facto tożsamy z artykułem autora opublikowanym w *Geophysics*-ie. Omówione w artykule rezultaty zostały wykorzystane do porównania różnych metod składania wykorzystywanych przez autora w dalszej części dysertacji.

Rozdział drugi rozprawy obejmuje porównanie różnych metod składania tras rejestrowanych siecią czujników dla potrzeb detekcji i lokalizacji wstrząsów mikrosejsmicznych. Rozdział powstał w oparciu o publikację w *Geophysical Prospecting*, wcześniejszą niż artykuł w *Geophysics*, wprowadzający probabilistyczną funkcję detekcji oraz o publikację na konferencji EAGE. Autor sam przyznaje, że omówione w tym rozdziale metody porównania metod składania różną się od późniejszych jego rezultatów, opisanych przez niego w rozdziale pierwszym, aczkolwiek prowadzą do podobnych konkluzji. Autor zwraca uwagę na kluczowe znaczenie poprawek na polaryzację sygnałów. Ich uwzględnienie daje najlepsze rezultaty dla detekcji zarówno gdy do składania jest stosowana funkcja *sambulance* a nawet proste sumowanie rekordów sejsmicznych. Doktorant trafnie zauważa, że poprawki te można określić po wykonaniu inwersji mechanizmu źródła a ta jest możliwa dopiero po pomyślnej detekcji wstrząsu i eliminacji szumu, co prowadzi do swego rodzaju klinczu. W dalszych rozdziałach doktorant proponuje konstruktywne rozwiązanie tego problemu składając moduły rejestracji a nie ich wartości rzeczywiste.

W kolejnym rozdziale doktorant zajmuje się omówieniem stosowanych przez siebie metod to redukcji szumów, w tym szumów skorelowanych. Prezentuje dwa filtry, które testuje na danych syntetycznych oraz rzeczywistych. Pierwszym jest wielokanałowy filtr splotowy (MCCF) stosowany do danych powierzchniowych. Filtr działa w dziedzinie częstotliwościowej. Korzystając z zestawu rejestracji na sąsiednich czujnikach rozpoznaje on skorelowany szum i prowadzi do jego wyłumienia. Filtr ten sam adaptuje się do danych oraz nie wymaga strojenia ani wiedzy na temat źródeł szumu. Druga metoda filtracji wykorzystuje transformację krzywkową (*curvelet*). Jest realizowana dla sekcji sejsmicznej traktowanej jak obraz. Dekompozycja obrazu w domenie krzywkowej zwykle pozwala łatwiej rozdzielić parametry sygnału i szumu niż np. w domenie czas-przestrzeń. Opracowany filtr efektywnie usuwa koherentny szum z obrazu, ale potencjalnie może usnąć również koherentny sygnał mikrosejsmiczny. Autor stwierdza, że w wypadku stosowania tej metody filtracji niezbędne jest zdefiniowanie parametrów opisujących emisję mikrosejsmiczną co zagwarantuje, że nie zostanie ona wyłumiona.

Kolejny rozdział zawiera implementację filtrów omówionych w rozdziale trzecim. Autor dysertacji używa w pierwszej kolejności danych semi-syntetycznych, tzn. danych będących sumą oryginalnej trasy zawierającej głównie szum i odpowiednio przeskalowanego silnego sygnału mikrosejsmicznego. Mają one reprezentować dane zarejestrowane podczas monitoringu podziemnego, tj dla czujników umieszczonych w głębokim odwiercie. Omawiana jest szczegółowo konstrukcja tego typu sygnałów o różnym stosunku S/N jak i rezultaty zastosowania filtrów MCCF. Wyniki testów upoważniły doktoranta do stwierdzenia, że zastosowana filtracja korelacyjna działa szczególnie efektywnie dla słabych sygnałów. W wypadku, gdy sygnał jest silny filtr powoduje usunięcie części sygnału użytecznego i przyczynia się do pojawienia niekorzystnych rewerberacji. W drugiej kolejności testowano zarówno filtrację splotową jak i filtrację krzywkową na drugim zestawie danych semi-syntetycznych reprezentującym dane rejestrowane na powierzchni. Autor stosuje różne metody przetwarzania wstępnego (np. filtrację pasmową, wyrównywanie tras) wraz z oboma typami filtrów. Wyniki testów wskazują na duży wpływ przetwarzania wstępnego na jakość otrzymywanych rezultatów filtracji. Generalny wniosek z przeprowadzonych analiz sprowadza się do stwierdzenia, że optymalne rezultaty otrzymuje się w wypadku zastosowania obu metod filtracji mimo pojawiania się nielicznych artefaktów i usuwaniu części energii sygnałów użytecznych.

Ostatni rozdział prezentuje wyniki detekcji i lokalizacji emisji mikrosejsmicznej dla danych zarejestrowanych podczas operacji szczelinowania hydraulicznego łupków gazonośnych. Doktorant po raz kolejny badał wpływ różnych procedur składania tras i różnych sekwencji przetwarzania wstępnego oraz metod filtracji na efektywność detekcji/lokalizacji zjawisk mikrosejsmicznych. Dane zostały wstępnie poddane filtracji pasmowej, wyrównywaniu tras, wielokanałowej filtracji splotowej i filtracji krzywkowej a następnie w firmie Seismic s.r.o. dokonano detekcji i lokalizacji zjawisk z zastosowaniem korekty polaryzacji na podstawie określanego równoległe mechanizmu źródła emisji. Tak utworzone zestawy zlokalizowanych zjawisk (tzw katalogi) zostały użyte przez doktoranta jako punkt odniesienia do jego własnych analiz. Używał on dziewięciu różnych wariantów przetwarzania wstępnego tras na których testował trzy różne metody ich składania. W przeciwieństwie do metod używanych w firmie Seismic s.r.o. doktorant używał wartości bezwzględnych tras i nie wprowadzał poprawki na polaryzację. Rezultaty prowadzonej przez siebie detekcji i lokalizacji zestawiał z rezultatami katalogu zawierającego pełną listę zjawisk. W rezultacie przeprowadzonych porównań doktorant powtórzył wniosek z poprzedniego rozdziału iż optymalne efekty przyniosło połączenie filtracji pasmowej, wyrównywania tras, filtracji splotowej i filtracji krzywkowej jako przetwarzania wstępnego oraz użycie funkcji *samblance* (lub prostego składania z funkcją *samblance* zastosowaną do kontroli) do detekcji i lokalizacji zjawisk.

Rozprawę kończy krótki rozdział w którym doktorant podsumowuje uzyskane rezultaty powtarzając w większości wnioski z poszczególnych rozdziałów.

Uwagi ogólne

Dysertacja w znacznej części jest rozwinięciem dwóch znaczących artykułów i trzech recenzowanych publikacji konferencyjnych, których doktorant jest głównym autorem. Już same te osiągnięcia, wykraczające zdaniem recenzenta ponad średni poziom dorobku naukowego osób przystępujących do obron doktorskich w dyscyplinie, upoważniają do wydania pozytywnej opinii w przedmiotowej sprawie. To, że doktorant zdecydował się na taką a nie inną formę rozprawy doktorskiej (tzn. na napisanie rozprawy doktorskiej a nie na obronę na podstawie listy publikacji) wymagało znacznej, dodatkowej pracy ze strony doktoranta lecz stwarzało nadzieję na uzyskanie i udokumentowanie kolejnych, ważnych wyników będących z jednej strony rozwinięciem a z drugiej dopełnieniem i uzupełnieniem tez stawianych w publikacjach doktoranta. Opisane w pracy doktorskiej osiągnięcia (pomijając te wcześniej opublikowane) rodzą jednak szereg pytań, które recenzent starał się ująć poniżej w ramach uwag ogólnych i szczegółowych.

Pierwsze obiekcje budzi brak jasno sformułowanych tez w rozprawie. Autor stwierdza (str.6) iż podejmuje się „.....opracowania ogólnego tła teoretycznego dla wybranej klasy metod opartych na migracji, porównaniu ich z istniejącymi metodami, a wreszcie na opracowanie zoptymalizowanej procedury, która maksymalizuje liczbę wykrytych i zlokalizowanych zjawisk sejsmicznych”. Pierwszy i drugi cel, zdaniem recenzenta, udaje mu się zrealizować z dobrym skutkiem natomiast jeśli chodzi o opracowanie zoptymalizowanej procedury, która maksymalizuje liczbę wykrytych i zlokalizowanych zjawisk sejsmicznych to sprawa jest dyskusyjna. Metoda jaką doktorant realizuje to ostatnie zadanie polegała (w dużym uproszczeniu) na porównaniu wyników detekcji i lokalizacji wykonanej przez doktoranta z wynikami przekazanymi mu przez firmę komercyjną Seismic s.r.o. Już samo takie podejście powoduje, że rezultaty interpretacji danych uzyskane przez tę firmę należy uznać za wzorcowe i w tym sensie sposób przetwarzania wyników tam realizowany za optymalny (skoro uznano rezultaty za cel do którego doktorant dążył). Tym samym jego własny sposób przetwarzania i analizy danych mikrosejsmicznych oraz uzyskane tą drogą rezultaty uznawał za optymalne gdy w jak największym stopniu pokryły się z innymi, w domyśle lepszymi, rezultatami. Takie podejście wg recenzenta jest nie do końca właściwe. Chodzi o właściwe sformułowanie celu badań. Być może lepiej byłoby postawić sobie zadanie opracowania takiej sekwencji przetwarzania danych by uniknąć wprowadzania poprawki na polaryzację sygnału (co jest kluczowym elementem procedury opracowanej przez firmę Seismic s.r.o.) a mimo to uzyskać rezultaty zbliżone do wzorcowej dla doktoranta sekwencji przetwarzania.

Pomijając powyższą konkluzję należy stwierdzić, że doktorantowi udaje się opracować sekwencję, która (mimo iż nie obejmuje odtworzenia mechanizmu źródła zjawiska) pozwala na detekcję i lokalizację podobnej ilości zjawisk co metoda obejmująca inwersję mechanizmu źródła. Szkoda, że autor dysertacji na wstępie tak nie sformułował jej celu.

Kolejna uwaga dotyczy stylu w jakim doktorant przedstawia w dysertacji swoje osiągnięcia. Te części dysertacji, które wcześniej zostały opublikowane w czasopiśmie naukowych lub w

abstraktach konferencyjnych spełniają wymagania co do wysokiej przejrzystości, zwięzłości i precyzji w prezentowaniu rezultatów. Dotyczy to w dużej mierze rozdziału pierwszego i drugiego a także fragmentów rozdziału trzeciego. Niestety również w tych jak i w pozostałych rozdziałach treść jest prezentowana w sposób dość rozwlekły, miejscami zbyt wielowątkowy by nie powiedzieć lekko chaotyczny. Autor stara się uporządkować treści dodając po każdym rozdziale krótkie podsumowanie co poprawia nieco czytelność całości jednak zdaniem recenzenta właściwsze zamiast podsumowań byłyby wstępy opisujące czego należy się spodziewać w danym rozdziale. Powinny się one odnosić do uprzednio sformułowanych tez dysertacji, stanowiących swego rodzaju plan rozprawy. Niestety we wstępie doktorant umieścił jedynie spis zagadnień jakie zostały ujęte w poszczególnych rozdziałach a cel tych badań sformułował w jednym, cytowanym powyżej zdaniu.

Doktorant prezentuje bardzo dużą ilość wyników, które obrazują dużą ilość pracy włożonej do ich przygotowania. Stara się udowodniać i prezentować rezultaty, które są niejednokrotnie oczywiste (jak np. znaczenie przetwarzania wstępnego w postaci wyrównywania tras) przez co ilość załączonych do pracy rysunków i omawianych przypadków sekwencji przetwarzania jest przytłaczająca. Tabela 5.2 podaje 27 przypadków różnych sekwencji przetwarzania wstępnego połączonych z różnymi technikami składania tras. Wydaje się, że ich liczba mogłaby zostać zredukowana do prezentacji najlepszych rezultatów. Podobnie ilość rysunków prezentująca rezultaty badań jest ogromna. Od strony 122 do strony 142 autorowi udało się umieścić 117 rysunków. Co dziwne niektóre nie zawierają żadnych treści (tzn. przedstawiają sam układ współrzędnych). Pomijając tę skądinąd nowatorską metodę prezentacji wyników badań (ponieważ łatwo zinterpretować w ten sposób rezultaty badań) należy jednak wyrazić żal, że doktorant nie wziął na siebie ciężaru selekcji uzyskiwanych przez siebie rezultatów i nie ograniczył zakresu, który nadaje się do zaprezentowania. Uczyniłoby to dysertację bardziej zbliżoną do rozprawy naukowej, w której autor przedstawia wnioski ze swoich badań a nie do notatek badacza, które zawierają wszystkie przeanalizowane przypadki, nawet te niewiele wnoszące i oczywiste.

Ostatnią uwagą jest zakres zaprezentowanych zagadnień. Zdaniem recenzenta autor powinien ograniczyć pracę do analizy danych mikrosejsmicznych rejestrowanych na powierzchni, które rzeczywiście są wielkim wyzwaniem dla interpretatorów. Doktorant swoje metody testował na danych semi-syntetycznych a następnie na danych rzeczywistych. Poszerzenie rozprawy o zagadnienia dotyczące danych rejestrowanych w odwiertach i to głównie danych semi-syntetycznych jest nieuzasadnione. Autor nie ma możliwości sprawdzenia części swoich metod przetwarzania na danych rzeczywistych (niewystarczająca liczebność czujników dla potrzeb stosowanych przez autora metod) a tym samym części dysertacji poświęcone przetwarzaniu danych wydają się być sztucznie dosztukowane do głównego nurtu omawianych zagadnień. Na stronie 79 pojawia się jedynie przykład zastosowania filtra MCCF do danych rzeczywistych jednak w dysertacji zakres podanych informacji o parametrach tych rejestracji jest niewystarczający, by obiektywnie ocenić przydatność i skuteczność prezentowanych przez autora metod przetwarzania.

Mimo tych kilku uwag krytycznych recenzent pozostaje pod wrażeniem osiągnięć doktoranta, szczególnie jeśli chodzi o skrupulatność prowadzenia badań jak i rezultatów w zakresie przetwarzania silnie zaszumionych danych powierzchniowych.

Uwagi szczegółowe

Poniżej przedstawiona została lista drobnych uwag jakie nasunęły się recenzentowi w trakcie czytania dysertacji. Mają one prawdopodobnie proste wyjaśnienie stąd proszę o krótkie ustosunkowanie się do nich w trakcie obrony.

1. Doktorant unika umieszczania referencji do własnych publikacji, jeśli chodzi o powtórnie zamieszczone w dysertacji rysunki, podobnie zresztą jak i przyklejonych z tych publikacji fragmentów tekstu. Ponieważ we wstępie autor wyraźnie odnosi się do swoich publikacji jako do źródeł a dysertacja, jako całość, nie będzie publikowana to nie uważam sprawy za duże uchybienie. Przez domniemanie przyjmuję, że przeniesione do dysertacji części artykułów są wyłącznie dorobkiem intelektualnym doktoranta. Jeśli nie wymagałyby odnośnych referencji w tekście dysertacji.
2. W opisie sygnału syntetycznego nie podano, jaka jest energia bądź amplituda szumu używanego do syntezy tego sygnału opisanego na stronie 16.
3. Nie podano uzasadnienia (a także referencji) do wzoru 1.12 opisującego sposób tłumienia sygnałów.
4. Definicja obwiedni podana we wzorze 2.1 nie występuje w artykule (Taner et al. 1979). Jest tam użyta ogólnie przyjęta definicja obwiedni jako pierwiastka z sumy kwadratów sygnału i jego transformacji Hilberta. Proszę o wyjaśnienie sprawy wzoru 2.1.
5. Na stronie 46 w drugim od dołu paragrafie autor stwierdza, że w drugim wierszu rysunków 3.1, 3.2 i 3.3 wartość impulsu na wykresie dekonwolucji jest taka sama na każdym z rysunków (w przeciwieństwie do impulsu na wykresach funkcji korelacji wzajemnej) – zgadam się tylko z drugą częścią tego stwierdzenia.
6. W paragrafie 4.2 brak szczegółowych informacji o parametrach sygnałów używanych do stworzenia sygnałów semi – syntetycznych.
7. Rysunki od 5.3 do 5.8 oraz 5.21 do 5.29 przedstawiają emisję zlokalizowaną w trakcie eksperymentu szczelinowania hydraulicznego. Ewidentnym felerem rysunków jest brak przebiegu odwiertu roboczego i położenia głowicy w trakcie prowadzenia rejestracji. Doktorant stwierdza jedynie, że ogniska gromadzą się w pewnym rejonie.
8. Ponieważ nie podano czy pomiary powierzchniowe były prowadzone w tym samym miejscu co pomiary w odwiercie (pewne uwagi autora sugerują, że jednak nie – choć nigdy nie stwierdza tego wprost) prędkości propagacji fali podłużnej w ośrodku różnią niemal dwukrotnie (str 83: 6170m/s na dla obszaru, gdzie pomiary prowadzone były w odwiercie zaś na str 147: 3500m/s dla obszaru, gdzie pomiary prowadzone były na powierzchni).

9. Jak w kontekście powyższej uwagi należy interpretować model prędkości ośrodka z rysunku 5.2? Skoro model ten był używany do obliczania czasów propagacji pomiędzy punktami o różnych głębokościach i offsetach (uwaga autora na str 107) to jak była dokładnie wykorzystywana prędkość 3500m/c podana na stronie 147. Proszę o wyjaśnienie.
10. Proszę również o wyjaśnienie jak na podstawie rysunku 4.21 zmierzono dominujący okres fali , równy 0.02s (również uwaga na stronie 142).

Dostrzeżone usterki techniczne:

Praca napisana jest praktycznie bez większych usterek technicznych. Listę dostrzeżonych usterek przedstawiono poniżej.

Str 19. „ For simplicity I a assume constant signal” – za dużo jedna litera

Str 111 „are shown in Figure 5.3 and 5.3.” – pomyłka

Str 120 błędny wpis w tabeli 5.2 dla BP_DS_TS_BAL/Sembl (nie zgadza się z opisem rysunku 5.12d)

Str 122 W podpisie rysunku 5.9 pominięto rysunek drugi od góry (w opisie jest wyszczególnione trzy rysunki mimo iż jest ich cztery)

Str 123 – w opisie rysunku 5.10c $N_{false} = -12$ (ujemna liczba zjawisk)

Str 146 “for the debalanced traces bu it was applied” – pomyłka w zdaniu

Wniosek końcowy

Podsumowując, zaprezentowana przez mgra Jacka Trojanowskiego dysertacja wnosi dużą wartość w udoskonalenie metod przetwarzania danych mikrosejsmicznych a w szczególności w metody redukcji szumów losowych i koherentnych oraz metody detekcji i lokalizacji słabych zjawisk sejsmicznych.

Praca doktorska udowadnia zdaniem recenzenta, iż mgr Jacek Trojanowski w sposób bardzo dobry opanował zagadnienia związane zarówno z sejsmologią inżynierską jak również z metodyką przetwarzania danych sejsmicznych oraz zrealizował 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 recenzent stwierdza, że rozprawa doktorska pana mgra Jacka Trojanowskiego pt. „Advanced migration

and filtration techniques for microseismic data” 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. i wnioskuje o dopuszczenie pana mgra Jacka Trojanowskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Lesiński.