



Prof. dr hab. inż. Jadwiga Jarzyna
Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie
Wydział Geologii Geofizyki i Ochrony Środowiska
Katedra Geofizyki

Recenzja

rozprawy doktorskiej pt. „Selected rock properties of the Lower Paleozoic shales from Baltic Basin based on the quantitative interpretation of the 3D wide-azimuth seismic data”
autorstwa mgr inż. Marty CYZ z Instytutu Geofizyki PAN w Warszawie,
wykonana na zlecenie Rady Naukowej Instytutu Geofizyki PAN w Warszawie z dnia 10 grudnia 2020 r.

1. Informacje ogólne

Rozprawę doktorską tworzą trzy artykuły naukowe i obszernie streszczenie na konferencję i wystawę EAGE opublikowane w latach 2018-2020. Wszystkie pozycje przed opublikowaniem zostały poddane procesowi recenzji. W takiej sytuacji skoncentrowałam się na ocenie działań badawczych i organizacyjnych, które doprowadziły do przygotowania rozprawy, nie skupiając się na elementach podlegających ocenie recenzentów publikowanych prac. Doktorantka jest pierwszą autorką w każdej pracy. Jej udział (60-85%) został zadeklarowany w oświadczeniach i potwierdzony przez Promotora.

Prace tworzące rozprawę doktorską

1. Seismic azimuthal anisotropy study of the Lower Paleozoic shale play in northern Poland, **Marta CYZ (80%)**, Michał Malinowski, Interpretation 2018 6(3), SH1-SH12 (Special section: Characterization of potential Lower Paleozoic shale resource play in Poland),
2. Brittleness prediction for the Lower Paleozoic shales in northern Poland. **Marta CYZ (60%)**, Marta Mulińska, Radomir Pachytel, and Michał Malinowski, Interpretation 2018 6(3), SH13-SH-23 (Special section: Characterization of potential Lower Paleozoic shale resource play in Poland),
3. Application of geostatistical seismic AVA inversion for shale reservoir characterization and brittleness prediction with machine learning, **Marta CYZ (85%)**, Leonardo Azevedo, Michał Malinowski, EAGE Annual 81st Conference + Exhibition, London, the United Kingdom, 2019, Tu_PO4_14, Extended Abstract, 4 pages,
4. Direct geostatistical seismic amplitude versus angle inversion for shale rock properties, **Marta CYZ (75%)** and Leonardo Azevedo, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, przyjęte do druku.

Prace badawcze, których wyniki stanowiły podstawę publikacji, były wykonane przez zespoły z udziałem Doktorantki i Promotora w ramach projektu badawczego nr BG2, SHALEMECH/14 (2014-2017) finansowanego przez NCBiR. Badania były dodatkowo finansowane w ramach prac statutowych IGF PAN w postaci grantu dla młodych badaczy, o co zadbała Doktorantka. Dane dostarczyło Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo S.A. Pomiar i standardowe przetwarzanie zdjęcia sejsmicznego Opalino 3D wykonała Geofizyka Toruń S.A. W pracach badawczych wykorzystano specjalistyczne oprogramowanie firm CGG GeoSoftware (programy Hampsona-Russella) i Schlumberger (program Petrel). Wykorzystano także oprogramowanie konsorcjum AASPI (Uniwersytet w Oklahomie) oraz oprogramowanie do geostatystycznej inwersji sejsmicznej CERENA/Instituto Superior Técnico (Uniwersytet w Lizbonie).

Biorąc pod uwagę przedział czasowy (2014-2020) oraz tematykę badawczą podjętą w ramach programu BlueGas - Polish Shale Gas Programme wyrażam uznanie dla Promotora i Doktorantki, którzy zaplanowali sekwencję prac i możliwość wykorzystania wyników pod kątem przygotowania rozprawy doktorskiej.

2. Cel prac i teza badawcza

Celem pracy było pokazanie, że wyniki zaawansowanej ilościowej interpretacji danych sejsmiki refleksyjnej 3D mogą być z powodzeniem wykorzystane do oceny wybranych parametrów petrofizycznych formacji łupkowych i uzyskania ich przestrzennego rozkładu, co może prowadzić do skutecznego zwiększenia efektywności poszukiwań i eksploatacji węglowodorów w niekonwencjonalnych złożach. Jako przykład testowy Doktorantka wykorzystwała ordowickie i sylurskie łupki w polskiej części basenu bałtyckiego, obejmujące formację z Sasina i ogniwo z Jantaru - poziomy bogate w materię organiczną. Identyfikując **problem badawczy** stwierdziła, że metody sejsmiki refleksyjnej standardowo stosowane do poszukiwania i kontroli eksploatacji konwencjonalnych złóż węglowodorów nie przynoszą oczekiwanych efektów w przypadku złóż niekonwencjonalnych ze względu na stosunkowo małą rozdzielczość. Zatem, postawiła **tezę badawczą**, że wyniki ilościowej interpretacji sejsmicznej mogą okazać się bardzo przydatne pod warunkiem zastosowania innowacyjnych metod przetwarzania i interpretacji ukierunkowanych na wydobycie informacji o szczelinowości, kruchości, zawartości materii organicznej i porowatości formacji łupkowych. Do tych metod zaliczyła zaawansowane techniki interpretacji ilościowej, w tym inwersję geostatystyczną skierowaną bezpośrednio na parametry petrofizyczne. Podkreśliła także znaczenie algorytmów symulacyjnych i maszynowego uczenia do integracji danych oraz algorytmów genetycznych do weryfikacji zbieżności wyników.

3. Zawartość rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska składa się z 3. części. W pierwszej Doktorantka scharakteryzowała znane z literatury wybrane metody ilościowej interpretacji sejsmicznej, metody geostatystyczne i uczenia maszynowego, które mogą być zastosowane w przypadku niekonwencjonalnych złóż węglowodorów do scharakteryzowania formacji i predykcji wybranych parametrów petrofizycznych. Znajomość metod była podstawą wyboru i zastosowania zaawansowanych technik interpretacyjnych w sejsmice refleksyjnej 3D, prowadzących do końcowego efektu – trójwymiarowego obrazowania i ilościowej charakterystyki wybranych parametrów: indeksu kruchości, związanego ze składem mineralnym, zawartości substancji organicznej oraz porowatości. W drugiej części Doktorantka przedstawiła zarys budowy geologicznej polskiej części basenu bałtyckiego w interwale występowania utworów paleozoicznych na tle ogólnych informacji strukturalnych i litologicznych. Zwróciła uwagę na specyficzne cechy opracowywanych formacji łupkowych, a w szczególności tzw. sweet spotów, t.j. ogniwa z Jantaru oraz formacji z Sasina, czyli dużą głębokość zalegania (ok. 3 km) oraz niewielką miąższość (<25 m). W trzeciej części znalazły się streszczenia autorskie publikacji stanowiących rozprawę. W tej części Autorka podsumowała przedstawione prace i wyciągnęła wnioski dotyczące udowodnienia tezy badawczej.

Omówienie artykułów

W pierwszej pracy Autorzy przeprowadzili analizę efektywności metody AVAz (zmiany amplitudy z azymutem) szacując gęstość i kierunek szczelin na podstawie parametrów anizotropii azymutalnej. Na podstawie wcześniejszych prac - analiz prędkości vs. azymut (VVAz), wykonanych na tych samych danych sejsmicznych oraz interpretacji profilowań geofizyki otworowej (sondą akustyczną ze źródłem dipolowym) zaobserwowano słabą sygnaturę anizotropii azymutalnej: 1-2%. Autorzy wybrali metodę AVAz, czując na otwarte szczeliny oraz możliwą do zastosowania wzdłuż wybranego horyzontu o małej miąższości. Wcześniej przeanalizowali zależności między różnorodnymi wielkościami, np. amplitudą szczelin indukowanych i parametrem g (opartym na prędkościach V_p i V_s) oraz wykonali modelowanie AVAz z wykorzystaniem danych geofizyki otworowej, aby potwierdzić, że sygnatura anizotropii azymutalnej będzie widoczna. Sprawdzili również, że przetworzone dane sejsmiczne spełniają wymagania analiz AVAz, czyli m.in. mają zachowane względne amplitudy i dostępny pełny zestaw azymutów. Ponieważ jednak stwierdzili, że dane mogły zostać zbyt wygładzone i pozbawione małych zmian amplitudowych, zastosowali indywidulane

przetwarzanie w postaci sektorowej migracji przed składaniem w domenie czasu (Pre-stack Time Migration) i dalsze przetwarzanie, np. w postaci filtracji ukierunkowanej na efekty strukturalne.

Wartość tej pracy w merytorycznym ciągu doktoratu polega na sprawdzeniu, że można uzyskać wyraźny efekt anizotropii azymutalnej na danych sejsmicznych przetworzonych i zinterpretowanych w sposób oryginalny. Nowatorskie podejście polega na zastosowaniu sektorowego przetwarzania dobrane do specyficznych warunków geologicznych oraz wykonanie modelowania w celu sprawdzenia, czy wybrane algorytmy doprowadzą do poprawnych wyników przy spełnieniu założeń. Ważnym elementem tej pracy jest również potwierdzenie rezultatów uzyskanych z sejsmiki przez wyniki interpretacji zapisów sondą do elektrycznego obrazowania ścianki otworu oraz danych mikrosejsmicznych. Taka konfrontacja wyników z różnych źródeł dała rozszerzenie informacji i była istotnym składnikiem nowatorskiej interpretacji.

Wartość drugiej publikacji polega na integracji danych ze źródeł geofizycznych o różnej skali i wykorzystaniu algorytmu statystycznej klasyfikacji utworzonego z użyciem Proximal Support Vector Machine (PSVM). Klasyfikację oparto na danych geofizyki otworowej, zebranych w sposób ciągły ale jedynie wzdłuż osi otworu i trójwymiarowych wynikach symultanicznej inwersji AVO. Wybrane dane geofizyki otworowej pozwoliły na obliczenie indeksu kruchości charakterystycznego dla obszaru basenu bałtyckiego. Wartości indeksu kruchości zostały podzielone na klasy, do których dopasowano wyodrębnione wyniki inwersji (impedancja fali P i S oraz gęstość objętościowa) w miejscach lokalizacji otworów. Wyniki z 4. otworów, z obszaru zdjęcia sejsmicznego, w interwale głębokościowym występowania formacji z Sasina i ogniwa z Jantaru zostały użyte razem, aby zapewnić odpowiednią liczbę danych w analizach statystycznych. Jako wynik uzyskano podział formacji łupkowych na części o zróżnicowanym stopniu kruchości w całym obszarze badań, w trójwymiarowym układzie. Nowatorstwo polegało na testowaniu różnych wyników BI oraz wykorzystaniu algorytmu statystycznej klasyfikacji PSVM.

W trzeciej pracy Autorzy skupili się na wykorzystaniu geostatystycznej inwersji sejsmicznej AVA (amplitude vs. angle) dla scharakteryzowania własności sprężystych łupkowych skał paleozoicznych oraz predykcji indeksu kruchości z użyciem algorytmu maszynowego uczenia. Sejsmiczna inwersja geostatystyczna jest iteracyjną procedurą opierającą się na prostej symulacji stochastycznej (Direct Stochastic Simulation, DSS) i ko-symulacji (co-DSS) jako metodach modelowania i algorytmie genetycznym zastosowanym do globalnej optymalizacji rozbieżności między wynikiem modelowania sejsmicznego i pomiaru. Nowatorstwo polegało na zastosowaniu innego sposobu inwersji w porównaniu do deterministycznej symultanicznej inwersji AVO opartej na niskoczęstotliwościowych modelach, dostarczającej wyniku wygładzonego, o niskiej rozdzielczości. Aby uzyskać wynik o wyższej rozdzielczości, bardziej przydatny do charakterystyki łupków o dużym stopniu niejednorodności Autorzy wybrali inwersję geostatystyczną. Nowością było zastosowanie takiej inwersji na zdjęciu sejsmicznym na złożu niekonwencjonalnym w sytuacji, gdy metoda jest stosunkowo nowa i rzadko testowana, nawet na złożach konwencjonalnych. Metoda ta pozwala także na wyznaczenie niepewności rozwiązania, ale wymaga danych wysokiej jakości i długich obliczeń.

Artykuł czwarty jest rozszerzeniem pracy 3. w zakresie wykorzystania geostatystycznej inwersji AVA dla bezpośredniego uzyskania parametrów petrofizycznych charakteryzujących potencjał węglowodorowy łupków. Autorzy rozpoczęli od tworzenia modelu petrofizycznego z wykorzystaniem stochastycznej sekwencyjnej symulacji i ko-symulacji na bazie ciągłej informacji o kruchości, zawartości materii organicznej oraz porowatości formacji łupkowej. W kolejnym kroku budowali model sprężysty, stanowiący podstawę do obliczenia sejsmicznych danych syntetycznych. Prace modelowe były powtarzane aż do uzyskania zadowalającego dopasowania między danymi z pomiaru i wynikami symulacji. Nowatorski element w tej pracy stanowił pomysł wyjścia od modelu petrofizycznego dla uzyskania trójwymiarowej informacji o rozkładzie parametrów BI (indeks kruchości), TOC (całkowita zawartość węgla organicznego) i porowatość.

Wszystkie prace powstały na bazie tych samych danych. Sekwencja przedstawionych rozwiązań pokazuje, że Doktorantka skupiła się na doskonaleniu metodyki pozyskania wyczerpujących informacji o parametrach petrofizycznych charakteryzujących skały łupkowe w trójwymiarowym układzie, w zadanym interwale głębokości i na zadanym obszarze na podstawie danych sejsmiki refleksyjnej 3D. Praca była prowadzona dwutorowo, z jednej strony Doktorantka starała się dobrać metodę inwersji sejsmicznej, poprzedzoną odpowiednim przetwarzaniem danych pomiarowych, aby uzyskać przestrzenny rozkład parametrów petrofizycznych dokładnie informujący o cechach formacji geologicznej. Z drugiej strony dążyła do optymalnego skalowania informacji pozyskanej z różnych źródeł geofizycznych chcąc uzyskać maksimum dokładności w zakresie wyznaczanych parametrów i maksimum rozdzielczości danych sejsmicznych. Analizując niedoskonałości metody AVAz sięgnęła po symultaniczną inwersję AVO w celu pozyskania informacji o wielkościach charakteryzujących sprężyste właściwości formacji skalnej, a następnie zastosowała geostatystyczną inwersję AVA dla bezpośredniego uzyskania trójwymiarowego rozkładu parametrów petrofizycznych charakteryzujących formację łupkową pod kątem wykrycia złoża i określenia parametrów jego optymalnej eksploatacji.

4. Ocena rozprawy

Przedstawione przez Doktorantkę **oryginalne rozwiązanie problemu naukowego** polegało na wyborze i zastosowaniu opisanych w literaturze i testowanych w wybranych warunkach geologicznych metod przetwarzania i ilościowej interpretacji danych sejsmicznych do bezpośredniego wyznaczenia właściwości łupkowych formacji skalnych o wysokiej zawartości materii organicznej, będących potencjalnymi, niekonwencjonalnymi złożami węglowodorów. Do oryginalnego osiągnięcia zaliczam także sprawdzenie stosowalności wybranych algorytmów symulacyjnych i klasyfikacji oraz ich wytestowanie na specyficznym materiale geologicznym, jakim są niewątpliwie paleozoiczne formacje łupkowe w basenie bałtyckim.

Wyraźnie podkreślam bardzo dobrą znajomość ogólnej wiedzy teoretycznej w dyscyplinie naukowej geofizyka w zakresie nowoczesnych metod przetwarzania i interpretacji sejsmicznej, nowych profilowań geofizyki otworowej, niosących informację o własnościach sprężystych, potrzebną do konfrontacji wyników sejsmicznych z wynikami innych metod. Podkreślam także porównanie wyników uzyskanych przy interpretacji sejsmiki 3D z wynikami zdjęcia mikrosejsmicznego. Akcentuję znajomość metod maszynowego uczenia i symulacji statystycznych stosowanych dla integracji danych geofizycznych. Wysoko oceniam wkład autorki w koncepcję geostatystycznej inwersji danych sejsmicznych w celu bezpośredniego wyznaczenia parametrów petrofizycznych.

Zadeklarowany wkład Doktorantki w opracowanie artykułów, potwierdzony przez Promotora i uzyskane wyniki wskazują na **umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej**. Dobra znajomość dostępnych technik interpretacji sejsmicznej pozwoliła na wybór i testowanie optymalnych rozwiązań, dobranych do warunków geologicznych. Uzyskane wyniki w zakresie rozwoju i przetestowania w niekonwencjonalnych warunkach geologicznych różnych metodyk interpretacji ilościowej danych sejsmiki refleksyjnej 3D oraz integracji informacji geofizycznej pochodzącej z różnych źródeł stanowią **osiągnięcie naukowe** i mogą być wykorzystane nie tylko w przypadku niekonwencjonalnych źródeł węglowodorów.

Uwagi dyskusyjne

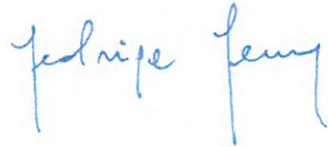
1. Doktorantka nie wyjaśnia, na czym polega wyższość zastosowanej metody Proximal Support Vector Machine w stosunku do metody wektorów nośnych (Support Vector Machine), obecnie stosunkowo często używanej w obliczeniach i opisanej w literaturze. Nie wyjaśnia także, dlaczego użyła ww. metody do wykonania klasyfikacji, zamiast np. sieci neuronowych. Podkreśliłam, że uznaję zastosowanie tej metody jako innowacyjne rozwiązanie. Jednak uważam, że użycie nowego rozwiązania powinno być poprzedzone wyjaśnieniem – dlaczego? Doktorantka wpisała jako swoje

- osiągnięcie predykcję z użyciem PSVM w artykułach 2. i 3. – „design and calculations” – art. 2, „calculations – art. 3”. Algorytm PSVM został dokładnie opisany w pracy Fung, Mangasarian, 2005 (Machine Learning), czy Doktorantka napisała samodzielnie kod i wykonała obliczenia?
2. Proszę o wyjaśnienie roli indeksu kruchości, BI w modelu, który zastosowano w artykule 4. W równaniu (2) w tej pracy występuje wielkość V_{BI} , opisana jako „effective brittleness mixture”, w równaniu (3.1) w Rozprawie wielkość V_{BI} , jest opisana jako „stiff matrix with the component minerals”. Indeks kruchości, BI jest wielkością niewymiarową, ilustrującą relację między zawartością różnych minerałów/składników w skale łupkowej. BI jest dobrze zdefiniowany i opisany w pracy 2. Natomiast wspomniane zależności (2) i (3.1) pretendują do „równania zachowania objętości” w petrofizyce. Jednak, aby tak było, konieczne jest poprawne zdefiniowanie występujących wielkości. Oprócz V_{BI} zdefiniowania wymaga także V_{TOC} . TOC jest geochemicznym wskaźnikiem obecności materii organicznej, definiowanym jako zawartość węgla organicznego, w odróżnieniu od nieorganicznego, np. w węglanach, które też bierze się pod uwagę obliczając BI. Wielkość TOC mierzona w laboratorium (np. Rock-Eval) jest podawana w procentach wagowych (wt. %). Przeliczenie wartości TOC [wt. %] na objętość kerogenu zwykle odbywa się przy pomocy zależności empirycznych wyznaczonych lokalnie dla badanych formacji. W równaniach wspomnianych wyżej występujące wielkości są ułamkami objętości. Zatem, jak w symulacjach i ko-symulacjach podaje się wartości V_{BI} oraz V_{TOC} ? Podobne wątpliwości budzi nieopisana relacja V_{TOC} , TOC i kerogen („kerogen (TOC)” w Rozprawie). W pracy Qian et al., 2019 (Marine and Petroleum Geology) jest poprawnie zdefiniowana wielkość „Brittle materials”, obejmująca minerały: kwarc, dolomit, ortoklaz, kalcyt, piryt, nie obejmująca kerogenu. W pracy 2. są dyskutowane różnie zdefiniowane indeksy kruchości i jako najlepiej dopasowany do warunków basenu bałtyckiego jest wybrany indeks kruchości BI_{BB} , w którym występuje TOC. W pracy 4. nie jest powiedziane wyraźnie, który z indeksów kruchości jest wykorzystany, można jednak założyć, że BI_{BB} , zatem występuje niekonsekwencja w definiowaniu składników modelu. Ta uwaga już nie może mieć praktycznego zastosowania w opublikowanych pracach, niemniej przedstawiam ją jako ważny element poprawnego definiowania tych samych wielkości przez różnych autorów i zwrócenia uwagi na rozbieżność pojęcia TOC w pracach geochemicznych i petrofizycznych oraz w pracach prezentujących wyniki sejsmiczne.
 3. O możliwości wyznaczenia niepewności wyników ilościowej interpretacji sejsmicznej wspomina Doktorantka w artykule 3. Jednak, nie przedstawia analizy niepewności, czy dokładności wyznaczenia parametrów petrofizycznych na podstawie inwersji sejsmicznej. Proszę o odniesienie się do problemu dokładności wyznaczonych parametrów. W artykule 4. podano jedynie odchylenie standardowe między średnią wartością estymowanych parametrów Brittleness, TOC i Porosity oraz wynikami uzyskanymi z geofizyki otworowej (Fig. 10). Na wspomnianym rysunku jest też zaznaczona kolorowa skala dla odchylenia standardowego, która chyba nie oddaje rzeczywistych wartości odchylenia.
 4. Proszę o wyjaśnienie, co daje zmniejszenie rozmiaru siatki (grid) przy pracach modelowych i interpretacyjnych w stosunku do siatki pomiarowej (art. 4.). Pomiar daje oryginalne wartości, które podczas zmiany rozmiaru oczek siatki są jedynie interpolowane.

Dyskusja na temat uwag w czasie publicznej obrony pozwoli na uzupełnienie informacji, która w artykułach nie zawsze mogła być podana w sposób w pełni zadowalający czytelników o zróżnicowanym profilu zainteresowań. Uwagi dyskusyjne nie rzutują na **pozytywną ocenę rozprawy doktorskiej**. Podobnie jak zaobserwowane błędy literowe, z których jeden chyba możliwy jest do poprawienia: w pracy 4. na rysunku 1, z lewej strony jest słowo „itarate” zamiast „iterate”, natomiast polskiemu czytelnikowi rzuca się w oczy niepoprawnie napisane nazwisko Teresy Podhalańskiej w pracy 1.

Uważam, że rozprawa **spełnia warunki przedstawione** w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U.2003 Nr 65 poz. 595. z

późn.zm.) oraz 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 postępowaniu o nadanie tytułu profesora i **Kandydatka może być dopuszczona do następnych etapów przewodu doktorskiego.**

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Jadwiga Lewy'.

Kraków, 19.01.2021