

**Recenzja rozprawy doktorskiej pt.: „Analiza zmian zapisu sejsmicznego z offsetem jako narzędzie do identyfikacji stref akumulacji gazu ziemnego w cienkowarstwowych utworach Zapadliska Przedkarpackiego”. Autor: mgr inż. Kamil Cichostępski**

Jakkolwiek od pierwszej opublikowanej pracy naukowej Ostandera (1982) opisującej zjawisko wzrostu wartości amplitud pola falowego wraz z wzrostem odległości odbiornika od źródła wzbudzenia drgań upłynęło już ponad 30 lat, to jednak problematyka sformułowana w tytule niniejszej rozprawy jest nadal aktualna i jest sukcesyjnie rozwijana.

Wiedza na powyższy temat wywodzi się z równania Zoeppritza (1919) ustalającego związek pomiędzy współczynnikiem odbicia płaskiej fali padającej na granicę ośrodka sprężystego i jego parametrami. Skomplikowany od strony matematycznej związek Zoeppritza faktycznie uniemożliwił stosowanie go w praktyce badań sejsmicznych. To zainspirowało wielu badaczy do poszukiwania rozwiązań aproksymujących które ułatwiają bezpośrednie zastosowanie relacji w praktyce. Autor niniejszej pracy zaprezentował kolejno aproksymacje: wg. Bortfelda (1961), Aki i Richardsa (1989), Wiggins'a (1986), Shuey'a (1985), Hiltermana (1898), Smith'a i Gidlowa (1987), Fattiego (1994) i określił zakresy ich działania. Z porównania dokonanego przez Russell'a (2014) równania Zoeppritza z aproksymacją Aki-Richardsa po przekształceniu przez Wigginsa wynika, że dla kątów padania fali mniejszych niż  $30^\circ$  obydwie aproksymacje są zbieżne z rozwiązaniem ścisłym.

W poszukiwaniach naftowych najczęściej stosuje się trójczłonową relację Wiggins'a w której pierwszy składnik niezależny od kąta padania zwany jest AVO Intercept i stanowi normalny współczynnik odbicia. Zależność pomiędzy współczynnikami odbicia i kątem padania fali są podstawą sformułowania klasyfikacji charakterystyk AVO w odniesieniu do piaskowców nasyconych gazem. Autor omówił aktualną klasyfikację wg. Simm'a i Bacona (2014) i przywołał również sposób krzyżowych wykresów wg. Castagna (1998) omawiając ich charakter i zasady stosowania. Niejednoznaczność w odróżnieniu zmian litologii od nasyconego węglowodorami piaskowca generuje potrzebę rozszerzenia zakresu metod oceny anomalii sejsmicznych. Dość powszechnym jest stosowanie iloczynów lub różnic poszczególnych atrybutów AVO, które pozwalają estymować własności ośrodka skalnego. Skutecznymi wydają się być: skalowana zmiana współczynnika Poissona, skalowana różnica refleksyjności fal podłużnych i poprzecznych w aspekcie oceny nasycenia gazem skał klastycznych. W przypadku zaistnienia dogodnych warunków estymacji trzeciego wyrazu aproksymacji Wiggins'a możliwym jest obliczenie względnej zmiany gęstości na granicy dwóch ośrodków, co pozwala na rozróżnienie rezydualnego nasycenia gazem od nasycenia umożliwiającą przemysłową eksploatację. Istotnym czynnikiem interpretacyjnym okazuje się tzw. Fluid Factor zdefiniowany jako wagowana różnica refleksyjności fal podłużnych i poprzecznych, który pozwala rozróżnienie ośrodka nasyconego wodą złożową od ośrodka nasyconego gazem. Autor scharakteryzował również metody z użyciem impedancji.

Akustyczna impedancja stosowana od lat 90-tych w przemyśle i stanowiąca w efekcie ocenę współczynników odbicia fali podłużnej została w latach późniejszych zastąpiona przez bardziej uniwersalną impedancję elastyczną wg. Connollego (1999) umożliwiającą uzyskanie inwersji w szerokim zakresie kątów padania. Przedstawiona została również rozszerzona wersja impedancji wg Whitcomba i Fletcher'a (2001) która może zostać zastosowana do obliczeń modułów geomechanicznych, stosunku prędkości fali podłużnej do poprzecznej i innych parametrów perofizycznych oraz symultaniczna inwersja wg. Hampsona (2005) na podstawie której uzyskuje się impedancję akustyczną, impedancję fali poprzecznej oraz gęstość co umożliwia obliczenie stosunku prędkości fali podłużnej do prędkości fali poprzecznej. Autor omówił również sposób Goodway'a et al. (1997) ekstrakcji iloczynów Lamé'go i gęstości skał na podstawie danych sejsmicznych przed sumowaniem. Stosunek tych parametrów uznawany jest jako dobry wskaźnik nasycenia węglowodorami. W zakończeniu tej części rozprawy autor relacjonuje sposoby ekstrakcji parametrów geomechanicznych przywołując relacje Gray'a (2002, 2012) i Russell'a (2011) pozwalające określić: współczynnik Poissona, moduł Younga, kruchość skał, twardość skał i wskaźnik zamknięcia szczelin. Reasumując, ta część rozprawy odnoszącą się do teoretycznych podstaw zmian amplitud z offsetem i metod interpretacji bazujących na tych zmianach została przedstawiona starannie i wyczerpująco.

Wymagania stawiane technice pomiarowej dla celów ekstrakcji informacji z analiz offsetowych są znaczenie wyższe niż w przypadku standardowych badań sejsmicznych ukierunkowanych na odwzorowanie strukturalne. Stąd ważnym elementem akwizycji danych jest właściwe planowanie rozkładów offsetów zapewniających uzyskanie odpowiednio dużych kątów odbicia fal. Autor słusznie akcentuje konieczność stosowania takich procedur przetwarzania danych, które zapewniają usunięcie lub przynajmniej znacznie osłabienie zakłóceń koherentnych i niekoherentnych. Stąd sugestia aby stosować transformację radialną oraz transformację Radona dla tłumienia fal powierzchniowych i wielokrotnych. Słuszna jest sugestia autora o celowości stosowania procedury odwrotnej filtracji tłumienia kompensującej efekt tłumienia wysokich częstotliwości wywołany odstępstwami od idealnej sprężystości ośrodka. Generalnie zakres procedur przetwarzania powinien zapewniać możliwość uzyskania rzeczywistych relacji amplitudowych a więc odzwierciedlać faktyczną refleksyjność ośrodka. Autor dysponował pomiarami sejsmicznymi wykonanymi przez Geofizykę Kraków i przetworzonymi w podstawowym zakresie. Specjalistyczny zakres procedur poszczególnych atrybutów wykonany był w systemie Hampson-Russell (2016). Poligonem doświadczalnym na obszarze Zapadliska Przedkarpackiego były utwory miocenu. W tym przypadku trudności w poszukiwaniu złóż gazu wynikają z cienkowieści utworów, zmienności litofacjalnych oraz generalnie – z małych obiektów poszukiwawczych. Istotnym jest więc rozróżnienie pochodzenia anomalii w zapisie sejsmicznym tj. stwierdzenie czy są one wywołane akumulacją gazy czy też zmianą własności fizycznych skał.

W jednostce zgłobickiej testowano metodykę AVO w obszarze zdjęcia trójwymiarowego 3D w strefie Waryś-Łętowice-Wierzchosławice na gruboławicowych, niewielkich złożach gazu ziemnego. Złoża te charakteryzują się porowatością dochodzącą do 30% i przepuszczalnością od kilkuset mD do kilku D. Na obszarze badań występują złoża gazu ziemnego: Łętowice, Bogumiłowice, Łazy. Dane geofizyczne stanowią reprocessing dwóch zdjęć 3D: „Wierzchosławice” oraz „Waryś-Łętowice” wykonanych w latach 90-tych.

W interpretacji wykorzystano profilowania geofizyki wiertniczej w 17 odwiertach; obejmowały one: profilowania prędkości interwałowych fali P, gęstość objętościową, porowatość, skład litologiczny, nasycenie wodą złożową, profilowanie gamma, profilowanie prędkości średnich. Tylko w otworach Trzydniaki-1 i Gosławice-1 i -2 wykonano profilowania prędkości fali poprzecznej S. Syntetyczne sejsmogramy obliczone na podstawie prędkości interwałowych skalibrowanych prędkościami średnimi posłużyły do dowiązania danych otworowych do danych sejsmicznych. W rezultacie, w ramach interpretacji strukturalnej wykonano mapy: stropu podłoża przed mioceńskiego Msp będącego zarazem stropem kredy górnej, poziom ewaporatowy oraz cztery granice chronostratygraficzne – M1, M2, M3, M4. Analizie AVO poddano dwa przekroje sejsmiczne. Ten przechodzący przez złożę Wierzchosławice wykazuje odpowiedź AVO kasy III, a przechodzący przez złożę Łętowice klasę AVO II. Klasa III AVO określa nasycone gazem piaskowce o niskiej impedancji i wysokiej porowatości, natomiast klasa II AVO odpowiada piaskowcom nasyconym gazem o impedancji zbliżonej do skał otaczających. Wg. autora najbardziej wyrazistymi w grupie atrybutów refleksyjnych okazały się: skalowana zmiana współczynnika Poissona, Fluid Factor, Product Polaryzacji, współczynniki odbicia fali poprzecznej oraz moduły geomechaniczne. Zaletą stosowania atrybutów impedancyjnych jest osłabienie wpływu sygnału sejsmicznego na odwzorowanie ośrodka. Spostrzeżenia autora uważam za słuszne.

Kolejnym obszarem badawczym była strefa Trzciana-Cierpisz-Zaczernie gdzie w heterolitowych utworach Cierpisz odkryto wielohoryzontowe złożę gazu. Interesującym jest przyrównanie strukturalnej strefy Mrowla-Bratkowice gdzie podobne heterolity przewiercone otworem Mrowla-1 wykazały nieprzemysłowe nasycenia gazem. W interpretacji wykorzystano wyniki obliczeń nasycenia gazem ziemnym z użyciem programu Satun ukierunkowanym na ośrodek cienkowarstwowy. Dane sejsmiczne uzyskano ze zdjęcia 3D wykonanego w latach 2006-2007. Proces przetwarzania materiałów pomierzonych obejmował standardowe operacje, ponadto zastosowano procedurę DMO dla eliminacji efektów kinematycznych wywołanych przeciwstawnymi kątami upadów granic refleksyjnych, migrację w dziedzinie częstotliwości i współrzędnych przestrzennych. Przetwarzanie przeprowadzono w trybie zachowania rzeczywistych amplitud w każdym etapie procesu. Korzystano z danych profilowań 9 otworów wiertniczych. W żadnym z nich nie wykonano profilowań interwałowych prędkości fali poprzecznych S. Dowiązanie danych sejsmicznych do danych otworowych zaprezentowano na przykładzie otworów Cierpisz-2 i Mrowla-1. Porównanie sejsmogramów syntetycznych z trasami sejsmicznymi wykazuje dużą zgodność. Podobnie jak w obszarze Wierzchosławice zinterpretowano granice chronostratygraficzne oznaczone jako M1, M2, M3, M4.

Badania wykazały, że strefa Mrowla-Bratkowice charakteryzuje się większymi anomaliami niż struktura Cierpisz. Występujące tu nasycenia gazem zlokalizowane są w cienkich warstwach o słabych własnościach złożowych, natomiast pakiety piaskowców o znacznie lepszych własnościach zbiornikowych są płonne. Autor wysuwa przypuszczenia, że sytuacja ta mogła być spowodowana migracją gazu do cienkich wkładek piaskowca lub ze względu na niską przepuszczalność gaz pozostał w pakietach mułowcowo-iłowcowych. Wydaje się, że ta druga hipoteza jest bardziej prawdopodobna. Obliczone atrybuty AVO korelują się ze strefami nasyceń gazem ziemnym i występują niezależnie od tego czy skałą

nasyconą są piaskowce czy mułowce i czy mają charakter gruboławicowy czy cienkowiekowy. Utrudnia to poprawną interpretację zwłaszcza w warunkach braku pomiarów prędkości fali poprzecznej.

Następnym obiektem badań był obszar Łańcut-Kańczuga na którym w 2009r wykonano sejsmiczne zdjęcia 3D przez Geofizykę Kraków. Ogólnym celem tych badań sejsmicznych było rozpoznanie i uszczegółowienie morfologii podłoża miocenu oraz wewnętrznej budowy miocenu autochtonicznego. Celem badawczym autora była analiza AVO dla złóż gazu ziemnego w utworach mułowcowo-piaskowcowych na przykładnie złoża Białoboki oraz Siedlecza. Stosowano standardowe przetwarzanie materiałów sejsmicznych z zachowaniem rzeczywistych amplitud. W interpretacji posługowano się danymi profilowaniami w 16 odwiertach z których 3 dysponowały również pomiarami prędkości interwałowych fal poprzecznych. Dowiązanie geologiczne uzyskano posługując się sejsmogramami syntetycznymi. Korzystano w tym celu z profilowań prędkości interwałowych skalibrowanych prędkościami średnimi. Skorelowano spąg podłoża przed-miocenckiego i jednocześnie stropu prekambriu oraz wewnątrzmiocenckie granice chronostratygraficzne oznaczone jako M1, M2, M3 oraz granicę nasunięcia karpacko-stebnickiego. Analizy AVO zostały poprzedzone wykonaniem filtracji pasmowej, zastosowaniem resztkowych poprawek statycznych i parabolicznej transformacji Radona. Pomimo zastosowania tych procedur ograniczono się do użycia równania dwuczłonowego Zoeppritza w zakresie kątowym od  $0^{\circ}$  do  $35^{\circ}$ . Do konstrukcji kolekcji AVA (Amplitude versus Angle) w otworze Białoboki-1 wykorzystano profilowania geofizyki wiertniczej. Generalnie eksperymenty w rejonie Białobok jak i w rejonie złoża gazu ziemnego Siedlecza potwierdziły skuteczność metody AVO w wykrywaniu złóż. Złoża te wykazują obniżenia impedancji fali podłużnej oraz spadek stosunku prędkości fali P do prędkości fali S co klasyfikuje te anomalnie zarówno w kategoriach klasy III jak i klasy II. Sugestie autora, że obecność anomalii klasy I związanych z cienkimi wkładkami piaskowcowo-mułowcowymi o wysokiej impedancji i obniżonym stosunku  $V_p/V_s$ , wysokiej porowatości ale niskiej przepuszczalności stwierdzone w otworach Siedlecza-2 i Siedlecza-3 można uznać za złożę typu tight gas znajduje uzasadnienie.

Rozprawa doktorska Kamila Cichostępskiego jest bardzo obszernym studium efektywności metody analiz zmian zapisu sejsmicznego z odległością od źródła wzbudzenia fal dokonany zarówno dla cienkowiekowych heterolitów jak i gruboławicowych piaskowców miocenu Zapadliska Przedkarpackiego. Autor poddał ocenie efektywność zarówno sposobów refleksyjnych jak i również metod impedancyjnych fal podłużnych i poprzecznych pozwalających ocenić geomechaniczne własności skał. Studium wykonane bardzo starannie i rzetelnie wymagało znacznej wiedzy z zakresu badań sejsmicznych, geofizyki wiertniczej, geomechaniki oraz geologii strukturalnej. Powyższe dokonania w pełni uzasadniają wniosek o nadanie Kamilowi Cichostępskiemu stopnia doktora nauk o ziemi.

