

SEJSMIKA MORSKA

SEJSMIKA Grzegorz Raś
akwizycja i nawigacja sejsmiczna **MORSKA**

© Copyright by Grzegorz Raś
Kraków 2013

ISBN 978-83-64275-19-7

Recenzja: prof. dr hab. inż. Jadwiga Jarzyna

Redakcja: Aleksandra Adamczyk
Korekta: Krzysztof Malczewski
Projekt okładki: Magdalena Raś, Grzegorz Raś
Skład: Joanna Bizior

Zdjęcia: archiwum CGG, zbiory Fundacji Bóbrka, Grzegorz Raś

Przedruk całości lub części zabroniony



Wydawnictwo LIBRON – Filip Lohner
al. Daszyńskiego 21/13
31-537 Kraków
tel. 12 628 05 12
e-mail: office@libron.pl
www.libron.pl

Książkę dedykuję moim Dzieciom

Spis treści

| | |
|--|-----|
| Przedmowa | 9 |
| Podziękowania | 11 |
| 1. Wstęp | 13 |
| 1.1. Sytuacja geoeconomiczna rynku węglowodorów | 15 |
| 1.1.1. Znaczenie ropy naftowej i gazu ziemnego | 20 |
| 1.1.2. Gaz łupkowy | 33 |
| 1.2. Węglowodory oraz sejsmika w Polsce i na świecie – ciekawostki i historia | 40 |
| 1.2.1. Rozwój sejsmiki lądowej | 48 |
| 1.2.2. Rozwój sejsmiki morskiej | 56 |
| 2. Sejsmika kluczem do wnętrza ziemi | 65 |
| 2.1. Podstawowe etapy badań sejsmicznych | 70 |
| 2.2. Pojęcia i terminologia sejsmiczna | 73 |
| 2.2.1. Pojęcia i definicje | 73 |
| 2.3. Zarys teorii sygnału sejsmicznego | 90 |
| 2.3.1. Amplituda, częstotliwość i faza sygnału | 91 |
| 2.3.2. Wavelet | 95 |
| 2.3.3. Aliasing | 106 |
| 2.4. Teoria propagacji fal sprężystych | 119 |
| 2.5. Fale sejsmiczne | 127 |
| 2.5.1. Fale użyteczne <i>P</i> i <i>S</i> | 135 |
| 2.6. Prędkości fal sejsmicznych | 137 |
| 2.7. Rozdzielczość sejsmiczna | 145 |
| 2.7.1. Tuning cienkiej warstwy | 148 |
| 3. Akwizycja morskich danych sejsmicznych | 155 |
| 3.1. Informacje ogólne | 155 |
| 3.1.1. Iluminacja | 159 |
| 3.1.2. Statek sejsmiczny | 160 |

| | |
|---|------------|
| 3.1.3. Morski kabel sejsmiczny | 166 |
| 3.1.4. Wyposażenie dodatkowe | 174 |
| 3.1.5. Morskie źródła sejsmiczne | 177 |
| 3.1.6. Grupowanie | 187 |
| 3.2. Pomiary streamerowe | 203 |
| 3.2.1. Akwizycja 2D | 204 |
| 3.2.2. Akwizycja 3D | 208 |
| 3.2.3. Akwizycja 4D | 217 |
| 3.3. Zaawansowane techniki akwizycji | 219 |
| 3.3.1. <i>Multi-azimuth</i> | 220 |
| 3.3.2. <i>Wide-azimuth</i> | 221 |
| 3.3.3. <i>Coil shooting</i> | 222 |
| 3.4. Akwizycja szerokopasmowa | 227 |
| 3.5. Techniki akwizycji OB (<i>Ocean Bottom</i>) | 240 |
| 3.5.1. Akwizycja 4-składnikowa | 245 |
| 3.5.2. Akwizycja 2-składnikowa | 247 |
| 3.5.3. Technika niezależnych węzłów | 248 |
| 3.5.4. Trwałe instalacje sejsmiczne | 249 |
| 3.6. Morskie pionowe profilowanie sejsmiczne VSP | 250 |
| 3.7. Akwizycja w strefach przejściowych | 253 |
| 3.8. Operacje w środowisku morskim | 255 |
| 3.8.1. Rezultat i wydajność operacyjna | 260 |
| 3.8.2. Dokumentacja | 263 |
| 4. Rola nawigacji w sejsmice morskiej | 267 |
| 4.1. Geodezja sejsmiczna | 268 |
| 4.1.1. GPS | 268 |
| 4.2. Pozycjonowanie | 273 |
| 4.3. Geometria pomiaru | 279 |
| 4.4. Kontrola jakości danych nawigacyjnych | 288 |
| 4.5. System nawigacyjny | 306 |
| 5. Zakończenie | 311 |
| Literatura | 317 |

Przedmowa

Inspiracją do napisania tej książki była nie tylko chęć dzielenia się i ułatwienia przyszłym sejsmikom/geofizykom lepszemu startu w przemyśle, lecz przede wszystkim to, że obecnie (podobnie jak w latach poprzednich) tematyczne publikacje w języku polskim są rzadkością, a jeśli już się pojawiają, to zawierają czysto teoretyczne i nierzadko przestarzałe aspekty akwizycji morskich danych sejsmicznych i ich przetwarzania.

Wiele czasu musiało minąć, zanim zdobyłem odpowiednie doświadczenie, wiedzę, a zwłaszcza nabrałem odwagi, co zmotywowało mnie do napisania niniejszej pozycji. Pierwszą myślą, jaką chciałem się podzielić, są słowa Konfucjusza z *Dialogów*:

„Powiedz mi, a zapomnę, pokaż mi, a zapamiętam, pozwól mi zrobić, a zrozumiem”.

Starałem się o nich pamiętać w trakcie pisania tej książki. Dlatego postaram się nie tylko opowiedzieć o realnych i teraźniejszych niuansach sejsmiki morskiej (głównie akwizycji danych sejsmicznych i nawigacji), lecz także zilustrować je za pomocą przejrzystych schematów oraz dokładnych i prostych rysunków. Nadrzędnym zadaniem, jakie sobie postawiłem, było bowiem trzymanie się nieskomplikowanej formuły treści, aby była ona przystępna i jasna oraz – mam nadzieję – zrozumiała.

W publikacji świadomie stosuję nazewnictwo angielskojęzyczne z uwagi na to, że w dzisiejszych czasach jest to „język świata”, a głównie dlatego iż jedyną formą zarówno komunikacji międzyludzkiej na projektach sejsmicznych, jak i realizacji tychże projektów jest właśnie angielski. Zdobyte do tej pory doświadczenie pozwala mi na stwierdzenie, że dotychczasowe tłumaczenia pojawiające się w literaturze polskiej są jedynie nieudolną próbą dosłownej translacji słów na język polski. Wierzę, że choćby przelotne zaznajomienie się z fachową terminologią pozwoli się lepiej przygotować do pracy na sejsmicznych stacjach roboczych, jak również ułatwi pierwszy kontakt z sejsmiką na świecie, o której większość ma jedynie podstawową wiedzę teoretyczną.

Opracowanie jest swoistą próbą wyjaśnienia zasad projektowania geometrii prospektu sejsmicznego, opartą na przykładach, jak również roli nawigacji (*Navigation Department*) i kapitana statku w akwizycji danych oraz ich prze-

tworzeniu w charakterystyczny dla sejsmiki morskiej sposób. Czytelnik znajdzie tutaj nie tylko rzetelne opisy procedur i modułów, z jakimi spotyka się w codziennej pracy sejsmik morski, lecz także rzeczywiste i dokładne przykłady ich aplikacji.

W książce zawarto szeroką wiedzę z zakresu sejsmiki morskiej, a także elementy planowania i prowadzenia projektów sejsmicznych w tym specyficznym środowisku pracy. Czytelnik przekona się, że geofizyk/sejsmik to zawód, który stanowi jedynie część większego zespołu, mechanizmu, który nie jest w stanie funkcjonować bez odpowiedniej współpracy z innymi departamentami, zbiorowo odpowiedzialnymi za powodzenie projektu sejsmicznego.

Książka ta jest pewnego rodzaju kompendium, w którym celowo ograniczono do minimum skomplikowane wzory, formuły i dowody matematyczne. Wyłożone tutaj przejrzyście i przystępnie podstawy matematyczne stanowią niezbędne narzędzie dla zrozumienia podstaw geofizyki i wstęp do przetwarzania danych sejsmicznych. Skoncentrowałem się na dziedzinach, którymi się zajmuję, ponieważ są mi najbliższe i lubię wierzyć, że rozumiem je w stopniu pozwalającym na dzielenie się wiedzą na ich temat. Szczegóły prowadzonych prac są bardzo trudne i mają matematyczny charakter, ale sądzę, że można przekazać zasadnicze idee bez nadmiernego matematycznego bagażu. Mam nadzieję, że zawarta w tej książce wiedza znajdzie swych odbiorców nie tylko wśród sejsmików, lecz także innych specjalistów z dziedziny geofizyki czy geologii. Pomimo że głęboko wierzę, iż książka ta jest napisana do rzeczy, to przede wszystkim dla ludzi.

Książka pozwoli na lepsze przygotowanie się do pracy zawodowej, będzie nieodzownym uzupełnieniem wiedzy teoretycznej wynoszonej z uniwersytetów. Kondycja polskiej literatury w zakresie sejsmiki morskiej jest zła, a wiedza przekazywana studentom w tej dziedzinie – skąpa, czysto teoretyczna i nieaktualna. Być może (mam nadzieję) wielu się ze mną teraz nie zgodzi. Niezgoda ta pozwoli na podnoszenie kwalifikacji ludzi z branży naftowej w Polsce i zainicjowanie ścisłej współpracy uniwersytetów i przemysłu na zasadzie wspólnej inspiracji i obopólnego wsparcia merytorycznego i kadrowego. Publikacja ta, wzbogacona o wiedzę opartą na wieloletnim doświadczeniu przemysłowym, umożliwi lepsze przygotowanie się do życia zawodowego pod względem praktycznym i teoretycznym. Informacje zawarte w tej książce posłużą nie tylko sejsmikom, lecz także geologom czy inżynierom pracującym w morskim środowisku terenowym.

Podziękowania

Książka ta opiera się w głównej mierze na wieloletnim doświadczeniu, zdobytym (jak lubię powtarzać) na morzach i oceanach tego świata, ale także w biurach i jednostkach naukowo-badawczych zajmujących się szeroko rozumianą sejsmiką poszukiwawczą. Pragnę w tym miejscu podkreślić zasługi wszystkich naukowców, którzy przyczynili się i wciąż przyczyniają do powiększania zasobów bibliograficznych dotyczących poruszanych w tej książce tematów. Stanowią one prawdziwą kopalnię wiedzy, z której czerpałem obficie, za co Wszystkim serdecznie dziękuję.

Moje szczególne podziękowania kieruję w stronę Wydawnictwa „Libron” – do Filipa Lohnera i Małgorzaty Piwowarczyk, którzy zainteresowali się moją propozycją i zaufali moim nadziejom pokładanym w tej książce. Dziękuję za wszelkie komentarze i słowa zachęty, dzięki którym projekt ten bardzo dużo zyskał. Wasze uwagi były bezcenne. Wielkie podziękowania należą się również całemu Zespołowi – Aleksandrze Adamczyk za redakcję, Krzysztofowi Malczewskiemu za korektę i Joannie Bizior za skład. Bez Waszych trafnych spostrzeżeń i naniesionych poprawek książka ta nie ujrzałaby światła dziennego. Gdybym był w stanie uwzględnić wszystkie Wasze sugestie, to byłaby ona jeszcze lepsza.

Bardzo dziękuję mojej recenzentce, prof. dr hab. inż. Jadwidze Jarzynie, za wszelką pomoc oraz za odwagę, która pozwoliła przebrnąć przez wstępne brudnopisy i ustalić „co autor miał na myśli”. W tym miejscu chciałbym podkreślić moją wdzięczność wobec Pani Profesor, bez której zaangażowania to wszystko nie byłoby możliwe. Pani wsparcie pozwala młodym ludziom rozwijać skrzydła.

Dodatkowo składaam wielkie podziękowania Wszystkim tym, którzy okazując mi zaufanie, pozwolili skorzystać ze swoich archiwów: dr. inż. Jerzemu Decowi, Panu Michałowi Góreckiemu z Muzeum Naftowego w Bóbrce oraz mojemu byłemu koleżeństwu z CGG: Sarze Pink-Zerling za niestrudzone dążenie do uzyskania pozwolenia na publikację materiałów i Mardsonowi Q. Macquay, od którego ten proces się zaczął. Cały zespół CGG były dla mnie inspiracją przez ostatnie pięć lat i większość tego, co znalazło się w tej książce, nauczyłem się dzięki pracy z Wami. Dziękuję!

Podziękowania należą się także mojej rodzinie: Rodzicom, Małgorzacie i Januszowi, oraz Bratu, Krzysztofowi. Ponieważ starałem się, aby ta książka była mało techniczna, to żywię nadzieję, że uznacie ją za nadającą się do czy-

tania i że pozwoli Wam przybliżyć to, czym się zajmowałem przez ostatnie pół dekady.

Ale najbardziej chciałbym podziękować mojej Żonie, Magdalenie. Przez cały czas pisania książki byłaś moim duchowym oparciem i to właśnie Ty jako pierwsza zapoznałaś się z moją pracą i wstępnymi wersjami rozdziałów. Jesteś moim wiernym towarzyszem i najlepszym Przyjacielem. Mogę zawsze liczyć na zastrzyk motywacji, ale przede wszystkim na Miłość z Twojej strony. Dziękuję Ci za to!

Wszelkie błędy, które przedostały się do książki, są wyłącznie moje!

1. Wstęp

Metody sejsmiczne mają na celu odwzorowanie ośrodka podpowierzchniowego w sposób jak najbardziej precyzyjny, a dokładność tego zadania jest stale wspomagana coraz to bardziej nowoczesnymi i zaawansowanymi technikami oraz innowacyjnymi algorytmami sejsmicznymi. Stanowią one zespół procedur realizowanych przy udziale mocy obliczeniowej potężnych komputerów, przeznaczonych do przetwarzania zarejestrowanych tras sejsmicznych. Zasadniczym celem tego procesu jest uzyskanie sekcji, przekrojów oraz map czasowych i głębokościowych, stanowiących podstawę interpretacji geologicznej.

Początkowo sejsmika służyła jako jedno z narzędzi poszukiwań węglowodorów, w szczególności ropy naftowej i gazu ziemnego. Z czasem liczba różnych zastosowań rosła i obecnie metodę tę wykorzystuje się w różnoraki sposób wszędzie tam, gdzie wymagana jest dokładna znajomość struktury geologicznej terenu. Przykładem mogą być:

- budownictwo: oceny stateczności podłoża;
- inżynieria lądowa: ocena ryzyka związanego z istnieniem pozostałości po eksploatacji górniczej, rozpoznanie terenu pod budowę autostrad, mostów, tuneli itp.;
- ochrona środowiska: wykrywanie potencjalnych lub istniejących zanieczyszczeń wód gruntowych;
- górnictwo: wykrywanie złóż kopalin;
- archeologia: wykrywanie pozostałości budowli znajdujących się pod wodą;
- poszukiwanie wód geotermalnych;
- oceanografia: rozpoznanie płytkiego dna morskiego;
- dla celów naukowych.

Główne cele wykonywania projektu sejsmicznego to:

- rozwiązywanie problemów poszukiwawczych;
- obrazowanie złóż (*seismic imaging*) – zaawansowane metody przetwarzania sygnału;
- charakterystyka złóż (*reservoir characterization*) i ich eksploatacji;
- monitorowanie podziemnych skupisk węglowodorów.

Badania sejsmiczne są istotnym sposobem i doskonałym narzędziem, aby zajrzeć pod powierzchnię ziemi i zobaczyć zalegające tam elementy, składające się na podziemną strukturę badanego obszaru (*prospect area*). Jak sama nazwa

wskazuje, wykorzystują impulsy sejsmiczne (*shots*) wzbudzone na powierzchni w celu dokładnego zobrazowania podziemnych formacji geologicznych. Zasadniczo fala sejsmiczna jest generowana (istnieją różne sposoby jej powstania), a następnie odbierana przez czujniki zwane „geofonami” bądź „hydrofonami” w postaci fal odbitych od podziemnych granic formacji skalnych. Proces ten staje się bardziej skomplikowany, gdy istnieją setki lub tysiące metrów wody pomiędzy powierzchnią ziemi a odbiornikami. Tym właśnie zajmuje się sejsmika morska.

W sejsmice lądowej metody generowania fal sejsmicznych w podłożu są raczej proste. Dynamit oraz metoda wibratorowa (*vibroseis*) są najbardziej praktyczne i powszechne. W sejsmice morskiej jednak użycie dynamitu zostało wyeliminowane ze względu na niebezpieczeństwo zagrożenia życia morskiego i kosztów obsługi dwóch statków niezbędnych do przeprowadzenia projektu sejsmicznego. Zamiast tego morskie statki sejsmiczne (*seismic vessels*) używają kombinacji tzw. dział powietrznych (*airgun arrays*) bądź tzw. dział wodnych (*watergun arrays*) i innych źródeł akustycznych (w mniejszym stopniu stosowanych) w celu wytworzenia interesującego nas impulsu sejsmicznego.

Istnieje mnóstwo podziałów sejsmiki w zależności od rodzaju wykonywanego badania, zastosowanego schematu, czy też „obiektu”, który chcemy zbadać (*target*). W literaturze można się spotkać z mniej lub bardziej dokładnymi i współczesnymi przykładami takich podziałów, jednak dla celów tej książki chciałbym się ograniczyć jedynie do tego najbardziej popularnego, który w moim przekonaniu jest z punktu widzenia przemysłu sejsmicznego najważniejszy:

1. Środowisko prospektu (*seismic environment*):
 - sejsmika morska,
 - sejsmika lądowa.
2. Rodzaj wykonywanego badania (*seismic acquisition*):
 - sejsmika dwuwymiarowa (2D),
 - sejsmika trójwymiarowa (3D),
 - sejsmika czterowymiarowa (4D),
 - sejsmika wielowymiarowa (np. 3D-3C, 4D-4C),
 - WAZ (*Wide-Azimuth Survey*),
 - OBC (*Ocean Bottom Cable*).
3. Rejestracja składowych fali sprężystej:
 - 1C – składowa podłużna (*P-wave*),
 - 3C – składowa podłużna i 2 składowe poprzeczne, wolna (*SH – horizontal S-wave*) i szybka (*SV – vertical S-wave*).

Zrozumienie wielowymiarowości zjawisk fizycznych ma ogromne znaczenie na etapie poszukiwania złóż ropy i gazu. Ilość mierzalnych wymiarów w sejsmice jest ogromna (Trzeźniowski, 2005). W sejsmice 2D mamy do czynienia z linią profilu sejsmicznego oraz zarejestrowanym czasem przebiegu fali re-