

## Badania sejsmiczne w aspekcie historycznym i współczesnym

Zygmunt Trześniowski\*

Długa jest historia przemysłu naftowego, a sejsmika prawie od samego początku była z nim ściśle związana. Sporo miejsca w prasie poświęca się naftcie, a niewiele wie, że sukces poszukiwawczy byłby znikomy, gdyby nie badania sejsmiczne. Swoje początki sejsmika datuje na lata 20. naszego stulecia. Jak wiadomo, od samego początku sejsmika korzystała z najnowszych osiągnięć techniki i tak jest do dnia dzisiejszego. Sprzęt sejsmiczny stosowany w sejsmice zawsze korzystał z najnowocześniejszych rozwiązań technologicznych i konstrukcyjnych, w dziedzinie elektroniki i telekomunikacji, a współcześnie i informatyki.

Dzięki stałemu postępowi technologicznemu i metodycznemu możemy obecnie w poszukiwaniu bituminów stosować sejsmikę trójwymiarową (3D). Zadaniem stawianym przed badaniami sejsmicznymi 3D jest rozwiązywanie zagadnień poszukiwawczych i złożowych. Najnowsze zastosowanie sejsmiki to rozwiązywanie problemów geologicznych w rozpoznawaniu budowy geologicznej na potrzeby eksploatacji wód geotermalnych. Sejsmika 3D odgrywa wiodącą rolę w poszukiwaniach węglowodorów, ponieważ dostarcza danych wysokiej rozdzielczości o budowie geologicznej osrodka i prawie ciągłych informacji nie tylko o jego geometrii, lecz również o rozkładzie parametrów stratygraficznych i litologicznych, charakteryzujących dany obiekt geologiczny. Metody sejsmiczne, a w szczególności sejsmika trójwymiarowa, posiadają wyjątkową właściwość, wyróżniającą je spośród innych metod geofizycznych, cechą komunikatywnego informowania geologów i specjalistów od inżynierii złożowej o interesujących ich zagadnieniach.

### Historyczny rys badań sejsmicznych

Projektowanie zdjęć sejsmicznych z wykorzystaniem metod refrakcyjnych i refrakcyjnych ma swoją długą historię. Jak podają: Mitera (1938), Bąk (1971), Kisłowski (1976), pierwsze próby zastosowania metody refrakcyjnej do badań struktur solnych wykonano w 1923 r. na terenie Polski oraz w Teksasie, gdzie w 1924 r. odkryto pierwszą strukturę roponośną. W 1923 r. Zakłady Solvay zleciły badania w okolicach Wieliczki niemieckiej firmie Seismos-Thyssen, które miały na celu wykrycie przedłużenia znanych już złóż soli. Do tego celu zastosowano tzw. refrakcję wachlarzową. Ta sama firma w 1924 r., na zlecenie przedsiębiorcy amerykańskiego, wykonała prace na wybrzeżu Zatoki Meksykańskiej (*Gulf-Coast*), odkrywając wiele wysadów solnych. Rok ten został uznany za początek przemysłowego zastosowania sejsmiki refrakcyjnej.

Pierwsza próba zastosowania metody refrakcyjnej miała miejsce w obecnych granicach miasta Oklahoma City w USA w dn. 4 czerwca 1921 r., a już w 1926 r. odnotowano pierwszy wielki sukces w wykorzystaniu jej do poszukiwań naftowych. Sejsmika refrakcyjna znalazła duże zastosowanie w poszukiwaniach ropy i gazu na początku lat 30. tych. Prawdopodobnie pierwsze kompletne zdjęcie sejsmiczne zaprojektowano i wykonano w USA w 1935 r. Rejestracje prowadzono na Bell Island w Luizjanie. Następne badania wykonywano w Oklahomie (USA). Zdjęcie sejsmiczne składało się z dwóch rozstawów odległych od siebie o 400 stóp. Odległości między punktami odbioru wynosiły 100 stóp.

W Polsce historia przemysłowego zastosowania sejsmiki datuje się od 1928 r., kiedy to powstała firma Pionier. Początkowo zlecenia Pioniera i Departamentu Górnictwa Ministerstwa Przemysłu i Handlu wykonywały firmy zagraniczne, m. in. firma Seismos. W 1929 r., przy Państwowym Instytucie Geologicznym, powstała Pracownia Geofizyczna, której zadaniem była koordynacja i pro-

wadzenia badań geofizycznych w Polsce. Jednakże wskutek braku środków finansowych uległa ona likwidacji w 1934 r. Afrykan Kisłowski (1976) tak pisał o polskiej sejsmice do 1956 r.:

... Szeroko reklamowane sukcesy prac geofizycznych w USA przy odkrywaniu wysadów solnych spowodowały, że i w Polsce zaczęto zastanawiać się nad możliwością posługiwania się w sposób systematyczny metodami geofizycznymi przy poszukiwaniach naftowych. Powyższa myśl została zrealizowana przez firmę lwowską pod nazwą „Spółka akcyjna Pionier dla poszukiwania i wydobywania minerałów bitumicznych”, w której ówczesny przemysł państwowy posiadał 51% akcji. W 1934 r. sprowadzono ze Stanów Zjednoczonych AP pierwszą aparaturę sejsmiczną refrakcyjną, wyprodukowaną jako nr 6 przez firmę Seismograph Service Corporation Tulsa. Aparatura posiadała 6 kanałów ...

W 1934 r. w strukturze wewnętrznej tej firmy został wyłoniony Pionierski Instytut Geofizyki Stosowanej, który prowadził badania w rejonie Daszawy i Borysławia. Cytowany już Kisłowski (1976) tak pisał o tych pracach:

... Pierwsze wyniki prac okazały się niepomysłne ze względu na wybór terenów odznaczających się wyjątkowymi komplikacjami budowy geologicznej oraz brak jakiegokolwiek doświadczenia metodycznego w pracach sejsmicznych. Pierwszy okres prac sejsmicznych cechuje rozpracowywanie szeregu zagadnień metodologicznych w zakresie technologii prac terenowych oraz interpretacji materiałów. Duża pomoc wówczas została okazana przez Zakład Geofizyki Uniwersytetu Jana Kazimierza we Lwowie (dr Józef Kreisler). Korzystny przełom w wynikach prac nastąpił z chwilą opanowania metodologii kartowania poziomu anhydrytowego. To co dziś wydaje się być dziecinnie proste, wówczas stanowiło barierę zdawałoby się nie do pokonania. Tak więc strzelanie w głębokich odwiertach strzałowych — według doświadczeń prowadzonych w Stanach Zjednoczonych i Rumunii w kompleksie rzecznych żwirów lub pod nimi powodowało powstanie bardzo intensywnych fal przypowierzchniowych, które zupełnie zniekształcały obraz refleksów. Przypadkowi zaważenia się odwiertu strzałowego i odstrzeleniu ponad żwirami należy zawdzięczać, że uzyskano znakomitej jakości refleksy i w ten sposób odkryto szeroką drogę dla stosowania sejsmiki na całym Przedgórzu Karpat...

Sukcesy w zakresie kartowania granic gipsowo-anhydrytowych w rejonach przykarpackich pod kątem rozpoznania budowy geologicznej i występowania węglowodorów, zadecydowały o zakupie w 1936 r. drugiej aparatury do prowadzenia refrakcyjnych badań sejsmicznych. Była to 6-kanałowa aparatura firmy Heiland Research Corp. z Tulsy. Ze względu na swoje parametry aparatura ta okazała się nieprzydatna w polskich warunkach i w laboratorium firmy Pionier została całkowicie przekonstruowana. W latach 1936–1937 wyprodukowano pierwszą serię polskich geofonów w liczbie 12 sztuk. Były to geofony elektrodynamiczne o parametrach konstrukcyjnych zbliżonych do geofonów amerykańskich, które jednak bardziej odpowiadały warunkom polskim. W 1938 r. na profilu sejsmicznym zlokalizowanym k. Sanoka po raz pierwszy w Polsce zastosowano grupowanie geofonów. Zastosowano wówczas grupowanie trzech geofonów na kanał, co dało widoczne polepszenie jakości rejestracji.

Oprócz Pioniera w 1938 r. działały jeszcze takie firmy, jak: Gazolina, Geotechnika I Małopolska, które wykonywały drobne prace dla przemysłu naftowego. Geotechnika-Poszukiwania Górniczo-Geologiczne Metodami Geofizycznymi spółka z o.o. została utworzona we Lwowie w 1938 r. przez dr Z. Miterę i inż. S. Wyróbkę, po ich odejściu z Pioniera. Posiadała ona wówczas nowoczesną aparaturę 12-kanałową, będącą prototypem późniejszej aparatury SS-24–48 i realizowała badania sejsmiczne zlecane przez Pań-

\*Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo S.A., Warszawa, Oddział Geofizyka Kraków, ul. Łukasiewicza 3, 31-429 Kraków

stwowy Instytut Geologiczny. Na początku Pionier i Geotechnika prowadziły badania, angażując do tego ekipy zagraniczne, a od 1934 r. zatrudniono własny, należycie przygotowany personel.

Dużym sukcesem prac poszukiwawczych, na które zwraca uwagę wielu autorów z tamtych lat, była pomoc udzielona geologii we wstępnym rozpoznaniu budowy przedgórze. Gorsze natomiast rezultaty osiągnięto w samych Karpatach.

O pracach sejsmicznych w Polsce pisał już Heiland w drugim numerze miesięcznika amerykańskiego Towarzystwa Geofizyków Poszukiwawczych *Geophysics* w 1936 r. (Heiland, 1936). W artykule tym Heiland opisywał prace Pioniera w południowo-wschodniej Polsce.

W czasie II wojny światowej tereny Polski były penetrowane przez firmy niemieckie *Seismos* i *Prakla*, które wykonywały m.in. prace sejsmiczne.

Po wojnie, już w 1945 r., wznowiono prace sejsmiczne, które prowadził Przedsiębiorstwo Państwowe-Wiercenia Poszukiwawcze. W 1947 r. zapoczątkowano prace sejsmiczne na obszarze Mielec–Solec, z zastosowaniem jednej z dwóch aparatów SS-24-48, które zostały dostarczone z ZSRR. W 1948 r. zastosowano w pracach sejsmicznych sprowadzoną ze Szwecji aparaturę 12-kanalową *Elektrisch Malbetning Stockholm*. Była to aparatura nowoczesna, ale wykonana przez firmę nie posiadającą dostatecznego doświadczenia w tego typu konstrukcjach. Badania sejsmiczne z zastosowaniem tej aparatury prowadził Oddział Geofizyki Poszukiwań Naftowych Centralnego Zarządu Paliw Płynnych. W 1950 r. zostało utworzone Przedsiębiorstwo Poszukiwań Geofizycznych w Warszawie, które w 1955 r. posiadało już 10 grup sejsmicznych. W 1954 r. powstał Zakład Geofizyki Kopalnianej Przemysłu Naftowego w Krośnie, który w 1955 r. miał własne dwie grupy sejsmiczne wyposażone w 26-kanalowe aparaty sejsmiczne SS-26-51-D oraz geofony SP-16. W dn. 17 lutego 1956 r. Prezes Centralnego Urzędu Naftowego inż. Zygmunt Zborowski utworzył, na bazie 6 grup sejsmicznych z PPG i grup geofizyki wiertniczej dawnego Zakładu Geofizyki Kopalnianej Przemysłu Naftowego, Przedsiębiorstwo Geofizyki Przemysłu Naftowego (PGPN), poprzednika obecnego Oddziału-Geofizyka Kraków Przedsiębiorstwa PGNiG SA w Warszawie (Sojka, 1996). Jesienią 1956 r. PGPN dysponowało w terenie 19 aparatami sejsmicznymi typu SS/26/51 produkcji ZSRR. W 1958 r. zakupiono dwie aparaty sejsmiczne produkcji amerykańskiej typu P-11 i G-33. Ta ostatnia umożliwiała zapis analogowy na taśmie magnetycznej (Ptak, 1996).

Metodyka badań sejsmicznych przeszła kolejne etapy ewolucji, od pojedynczych sondowań, poprzez profile liniowe — 2D z kilkoma odmianami profili krzywoliniowych i łamanych, dochodząc do obecnie stosowanej metodyki 3D. Niebagatelne znaczenie w rozwoju metod sejsmicznych miało zastosowanie wibratorów, jako źródeł wzbudzania fal sejsmicznych, które datuje swój początek na 1952 r. Pomysł ten narodził się w firmie *Bill Doty of Continental Oil Company* w USA. Pierwszy eksperymentalny sejsmogram z zastosowaniem metody *Vibroseis* otrzymano w 1953 r.

Przypuszczać należy, że pozytywny wpływ na późniejszy rozwój sejsmiki trójwymiarowej miało ogłoszenie przez Maynea w 1967 r. koncepcji wspólnych punktów głębokościowych. Rozważania o możliwości wykonywania sejsmicznych zdjęć trójwymiarowych, pojawiały się w literaturze już w latach 50. i na początku lat 60. Pewnego rodzaju namiastką profilowań trójwymiarowych miały być tzw. szerokie profile,

ale nie zyskały one akceptacji na szeroką skalę przemysłową.

Pierwsze eksperymentalne badania sejsmiczne 3D zostały przeprowadzone w 1967 r. przez *Exxon Production Research Company* k. Houston w Teksasie. Duże zasługi w zakresie rozwoju sejsmiki 3D ma Wolton, który chyba jako pierwszy w szerszym zakresie w 1970 r. przedstawił koncepcję sejsmiki trójwymiarowej w ujęciu teoretycznym. Prace nad modyfikacją schematu obserwacji kontynuowało wiele firm naftowych i wysiłek ten zaowocował w 1973 r. pierwszym produkcyjnym zdjęciem 3D, które na zlecenie konsorcjum *Amoco, Arco, Chevron, Mobil, Philips* i *Texaco* wykonała na lądzie w rejonie Lea County (New Mexico), znana firma geofizyczna — *Geophysical Service Inc.* Ten sam kontraktor w 1975 r. przeprowadził pierwsze przemysłowe badania 3D na morzu dla *Sun Oil Company*. Właśnie na morzach udział tej technologii wzrastał początkowo najszybciej. W Europie jedno z pierwszych zdjęć 3D na lądzie zostało wykonane w Holandii w 1975 r. przez firmę *Shell*.

Robertson (1989) podaje, że o ile do 1980 r. wykonano na całym świecie ok. 100 zdjęć 3D, to w 1989 r. było ich ponad 1000. O fakcie tym zadecydował osiągnięty poziom rozwoju w dziedzinie sprzętu i oprogramowania, dzięki czemu można było na skalę przemysłową realizować metodykę badań 3D.

Wraz z zastosowaniem sejsmiki trójwymiarowej do celów poszukiwawczych, zaczęto się zastanawiać nad jeszcze innym wykorzystaniem tej metody, m.in. do rozwiązywania zagadnień inżynierii złożowej. Pierwsze zastosowanie sejsmiki 3D w inżynierii złożowej datuje się na wczesne lata siedemdziesiąte. Jedno z pierwszych zdjęć na złożu, o ile nie pierwsze, zostało wykonane w północnej Alasce na złożu *The Prudhoe Bay*.

Warunkiem rozwoju refleksyjnej sejsmiki trójwymiarowej było powstanie nieodzownego sprzętu, poczynając od PC, bez którego trudno jest kontrolować w sposób optymalny proces rejestracji danych w polu, poprzez telemetryczną, skomputeryzowaną aparaturę sejsmiczną z wyszukaną elektroniką o stabilnych parametrach, zachowującą niezmiennie charakterystyki nawet w ekstremalnych warunkach terenowych, komputery i ich peryferia stanowiące wyposażenie ośrodków obliczeniowych, kończąc na stacjach roboczych o dużych zasobach pamięci i dużej szybkości transmisji danych oraz wykonywania obliczeń.

Technologia 3D wymaga specyficznego oprogramowania dla PC do celów QC (*quality control*) i prac geodezyjnych, dla komputera aparatury polowej, na potrzeby processingu i interpretacji. Software ten tylko częściowo jest wspólny z 2D. Jakkolwiek sprzęt i oprogramowanie potrzebne do wykonywania badań 3D są ciągle bardzo kosztowne, to jednak cena, jaką płaci się za ilość i wiarygodność informacji maleje. Pojawiają się również dane, których dawniej nie można było wyekstrahować z zapisu sejsmicznego, głównie z powodu niedoskonałości softwareu processingowego lub wykorzystać z powodu braków softwareu interpretacyjnego. Relacja kosztów uzyskania informacji za pomocą sejsmiki do kosztów uzyskania informacji za pomocą wierceń w ostatnich latach staje się bardziej korzystna dla sejsmiki. Postęp ten dotyczy nie tylko wyników badań 3D, ale także 2D. W pierwszym przybliżeniu coraz bardziej oczywiste staje to, że zdjęcia 2D powinny być stosowane we wstępnym etapie rozpoznawania budowy geologicznej, lub jako uzupełnienia zdjęć już istniejących, a zdjęcia 3D we wszystkich pozostałych przypadkach.

Można też na ten problem spojrzeć nieco inaczej. Jeżeli zawartość informacyjna wyników zdjęcia 2D jest wystar-

czająca dla prowadzenia poszukiwań lub eksploatacji złoża to po co wydawać pieniądze na kosztowne badania 3D. Zalecając badania sejsmiczne klient płaci za ilość i jakość informacji. Sprowadzając problem do etapu badań terenowych, często największe nieporozumienie przy porównywaniu kosztów zdjęć 2D i 3D polega na tym, że nie próbuje się nawet porównać ilości danych zbieranych przez grupę sejsmiczną w określonej jednostce czasu i jakości tych informacji.

### Zastosowanie badań sejsmicznych 3D

Badania sejsmiczne dla przemysłu naftowego wykonywane są na potrzeby eksploatacji i w poszukiwawczych węglowodorów do rozwiązywania problemów geologicznych. Badania te są stosowane również w poszukiwaniach innych minerałów, w pracach związanych z ochroną środowiska, do celów inżynierskich, w poszukiwaniu wód geotermalnych, na potrzeby oceanografii, jak również do celów naukowych.

Ponad 76% środków finansowych przeznaczają się na badania sejsmiczne na potrzeby przemysłu naftowego (Goodfellow, 1991). Większość związanych z tym trójwymiarowych badań sejsmicznych jest prowadzonych z myślą o rozwiązywaniu problemów geologicznych.

Badania sejsmiczne są również zlecane dla celów inżynierii złożowej, a w szczególności do minimalizacji nakładów ekonomicznych, przeznaczonych na rozpoznanie zasięgu węglowodorów w złożu oraz w celu ograniczenia inwestycji kapitałowych i operacyjnych. Osobliwością badań sejsmicznych wykonywanych na potrzeby gospodarki złożem (tzw. sejsmika 4D), jest cykliczne powtarzanie badań w celu obserwacji zmian spowodowanych jego eksploatacją, czemu zawsze towarzyszy przemieszczanie się płynów wypełniających zbiornik. Przy zachowaniu pewnych zasad podczas rejestracji danych i ich przetwarzaniu, w sprzyjających warunkach porównywanie obrazów uzyskiwanych na różnych etapach eksploatacji złoża, pozwala śledzić jej przebieg i podejmować decyzje optymalizujące ten proces.

Podejmowane są również (z różnym powodzeniem) próby uzyskiwania ważnych informacji o ewentualnym występowaniu stref anomalnie wysokich ciśnień płynów złożowych, co z punktu widzenia konstrukcji otworu i technologii jego głębinienia ma bardzo istotne znaczenie.

Większość zdjęć 3D jest projektowana dla szczegółowego rozwiązania rozmaitych problemów związanych z budową geologiczną danej struktury. Na ogół budowa danego obiektu geologicznego jest znana w zarysie z wcześniej wykonanych badań sejsmicznych 2D. W takim przypadku zadaniem projektanta jest ustalenie zakresu prac sejsmicznych 3D i dobór metodyki dla tych badań. Niektóre zdjęcia są projektowane w celu poznania stratygrafii badanej struktury. Przystępując do projektowania, zadaniem projektującego zdjęcie 3D jest ustalenie obszaru danego zdjęcia z uwzględnieniem rozdzielczości, efektów dyfrakcyjnych oraz kierunków przebiegu cech strukturalnych.

Trójwymiarowe zdjęcia sejsmiczne stosuje się przede wszystkim do rozpoznawania skomplikowanej budowy geologicznej złóż węglowodorów związanych z takimi formami, jak np.:

- wysady solne,
- strefy uskokowe,
- uskoki nasuwcze,
- strefy ryftowe.

Zdjęcia 3D stosuje się również do rozpoznawania cech

geologicznych form niestrukturalnych (facje sejsmiczne), jak również do małych obiektów geologicznych, np.:

- stromo wypiętrzone rafy,
- uszczelnienia struktur o przebiegu serpentynowym,
- bloki uskoków,
- wały i bariery,
- piaski wypełniające kanały,
- brekcje wypełniające kawerny itp.

Projektowanie zdjęć 3D jest w pewnym sensie sztuką, w której podstawę stanowią powszechnie akceptowane i udokumentowane kryteria, a projektujący wykonuje dzieło w oparciu o własne doświadczenie.

Etapem poprzedzającym projektowanie zdjęcia trójwymiarowego jest rozbudowana faza wstępna, obejmująca szczegółową analizę czynników geologicznych i metodycznych, determinujących dobór parametrów schematu obserwacji dla przyszłych badań terenowych, mających na celu rozpoznanie obiektu geologicznego. Bazą wyjściową w projektowaniu refleksyjnego zdjęcia trójwymiarowego są niewątpliwie wyniki dotychczasowych badań sejsmicznych 2D. W trakcie projektowania należy mieć na uwadze fakt, że celem prac sejsmicznych 3D nie jest wyłącznie poprawienie stosunku sygnału do szumów. Podstawowym celem takiego zdjęcia jest poprawienie jakości odwzorowania budowy badanego ośrodka geologicznego. Tak więc, jeżeli archiwalne dane sejsmiczne na profilach 2D są jakościowo słabe to można się spodziewać, że zarejestrowane informacje na zdjęciu 3D będą również niezadowolające.

Dobór parametrów schematu obserwacji wiąże się z ustaleniem optymalnych, a ściślej kompromisowych wielkości parametrów, co jest podyktowane uwarunkowaniami ekonomicznymi, a w szczególności planowanymi nakładami na prace poszukiwawcze i w dalszej kolejności oczekiwanymi zyskami.

Ze względów ekonomicznych podejście do badań sejsmicznych 3D jest odmienne w porównaniu do sejsmiki 2D. W przypadku badań trójwymiarowych zbyt radykalne dążenie do realizacji optymalnych założeń może znacząco podnieść koszty wykonania tych prac. Jeżeli przewidywane koszty okażą się zbyt wysokie w stosunku do oczekiwanych zysków, to należy dążyć do zmiany niektórych parametrów metodycznych, aby w rezultacie obniżyć koszty prac (np. dokonać zmiany odległości między punktami odbioru, odległości między punktami wzbudzenia, odległości między liniami punktów odbioru i punktów wzbudzenia, liczba punktów wzbudzenia przypadająca na patch, krotność profilowania, itd.). Ostateczna postać projektu będzie niewątpliwie wynikiem kompromisu w wyborze optymalnych parametrów spośród wykonanych kilku jego wersji.

Podstawową zasadą badań 3D jest takie ich zaprojektowanie, aby skutki małego błędu nie rzutowały na całość projektu i aby nie stały się one źródłem zaprzepaszczenia oczekiwanego wyniku końcowego. Tak więc, poprawne projektowanie i realizacja badań w przypadku zdjęć trójwymiarowych odgrywa szczególnie ważną rolę. Stosując specjalistyczne oprogramowanie można zaplanować szczegółowo właściwe postępowanie w trakcie prowadzenia prac terenowych. Wysokie wymagania metodyczne w badaniach 3D nie pozwalają na rezygnację z wcześniej zaplanowanych punktów wzbudzenia i punktów odbioru, ponieważ obniża to krotność profilowania oraz pogarsza się rozkład offsetów i azymutów tras sejsmicznych. W zamian za to, w wyniku analizy, mając na uwadze równomierny rozkład parametrów, wybiera się zastępcze miejsca na punkty wzbudzenia.

Dobór optymalnych parametrów schematu obserwacji

przypomina proces decyzyjny dotyczący poszukiwania zagubionej w pokoju monety, polegający na ustaleniu, kiedy opłaca się przesuwać meble, a kiedy nie.

Zleceniodawca badań sejsmicznych 3D określa projektantowi przewidywane nakłady, oczekiwane zyski poziom dopuszczalnego ryzyka.

Przy projektowaniu badań sejsmicznych 3D mamy do czynienia z różnego rodzaju czynnikami, wpływającymi na jego ostateczny kształt. Najważniejsze z nich to:

#### 1. Czynniki sejsmogeologiczne:

— budowa ośrodka geologicznego (np. rodzaj pułapki — strukturalna, facjalna; głębokość zalegania i miąższość obiektu geologicznego),

— rozmiary badanego obiektu geologicznego,

— upady warstw geologicznych i granic sejsmicznych,

— rozkład prędkości w badanym ośrodku,

— cechy geologiczne interesujące geologów (np. wymiary struktur, tempo zmian facji),

— tektonika,

— źródła zakłóceń.

#### 2. Czynniki metodyczne:

— dopuszczalna metodyka badań, rodzaj schematu obserwacji,

— odległości między liniami punktów wzbudzenia i odbioru,

— cechy (atrybuty) binu (rozmiary binu, krotność profilowania, rozkład offsetów i azymutów tras),

— geometria rozmieszczenia punktów wzbudzenia i punktów odbioru.

#### 3. Czynniki technologiczne:

— rodzaj i dostępne konfiguracje aparatury sejsmicznej, — rodzaj i parametry źródła energii (np. dopuszczalna głębokość otworów strzałowych, dopuszczalna masa ładunku, parametry sweepu),

— sposób grupowania geofonów,

— sposób grupowania punktów wzbudzenia itp.,

#### 4. Czynniki ekonomiczno-organizacyjne:

— koszt wykonania zdjęcia 3D (np. robocizna, sprzęt, opłaty, koncesje, materiały, paliwo, odszkodowania itp.),

— koszty stałe i zmienne utrzymania grupy sejsmicznej,

— wydatki nieprzewidziane i straty,

— planowane zyski,

— obsada osobowa,

— miejsce i okres prowadzenia badań terenowych,

— warunki umowy determinujące postęp badań,

— tempo prowadzenia prac polowych,

— ochrona środowiska,

— stopień trudności dostępu do rejonu badań,

— dostosowanie wykonawstwa do obowiązującego prawa geologicznego i górniczego.

Z punktu widzenia użytkownika (kompanii naftowej) niedoskonałość badań sejsmicznych 2D odzwierciedla się w nieprecyzyjnej lokalizacji otworów wiertniczych, które są najkosztowniejsze w całym etapie poszukiwań.

Korzyści wynikające z metody 3D można podzielić na trzy rodzaje (Trześniowski, 1996):

— metodyczne,

— geologiczne,

— ekonomiczne.

Korzyści metodyczne to:

— gęste przestrzenne próbkowanie, pozwalające na wiarygodną identyfikację zarejestrowanych refleksów sejsmicznych z budową geologiczną,

— informacje zawarte w sygnale sejsmicznym,

— lepsze zogniskowanie źródeł fal dyfrakcyjnych (prze-

de wszystkim prawidłowa lokalizacja nieciągłości tektonicznych) i rozdzielczości obrazu falowego.

Korzyści geologiczne to:

— dokładne odwzorowanie budowy geologicznej,

— detalizacja struktur zbiornikowych węglowodorów poprzez zdefiniowanie geometrii i wewnętrznej budowy złoża.

Korzyści ekonomiczne to:

— wyniki zdjęć 3D prowadzą do wyeliminowania z poszukiwań struktur nieprodukcyjnych i nie posiadających optymalnych parametrów produkcyjnych. Zmniejsza to koszty związane z otworami nietrafionymi (suchymi) i słabo produktywnymi. Koszty związane z wierceniem otworu szacowane są w milionach dolarów i wszelkie nietrafienie takim otworem w strukturę gazonośną lub roponośną jest stratą firmy poszukiwawczej. Koszt wykonania zdjęcia 3D o wielkości kilkudziesięciu kilometrów kwadratowych jest porównywalny z wywierceniem otworu. Za cenę jednego otworu wiertniczego o głębokości ok. 1500–2500 m można wykonać zdjęcie trójwymiarowe o powierzchni kilkunastu kilometrów kwadratowych, które dostarczy nieporównywalnie więcej informacji.

— optymalizacja lokalizacji miejsc pod wiercenia, zapewniająca tym samym większe odkrycia i w ślad za tym idący sukces ekonomiczny inwestorów.

Detalizacja struktur zbiornikowych za pomocą zdjęć 3D polega na:

— ustaleniu rodzaju pułapki zbiornikowej,

— zdefiniowaniu miąższości warstwy złożowej,

— lokalizacji konturów między substancjami złożowymi,

— określeniu współczynnika porowatości,

— określeniu nakładów inwestycyjnych.

### Badania sejsmiczne w przyszłości

Przyszłość sejsmiki 3D będzie się koncentrowała wokół następujących zagadnień:

— zmniejszenie kroku próbkowania czasoprzestrzeni,

— zmniejszenie rozmiarów binu,

— wzrost krotności profilowania,

— równomierny rozkład offsetów tras,

— rejestracja wszystkich składowych sygnału sejsmicznego,

— uwarunkowania ekonomiczne.

Jeszcze nie przebrzmiały echa rewelacji związanych z sejsmiką trójwymiarową, a już pojawiła się sejsmika 4D. W ogólnym pojęciu sejsmika 4D odnosi się do zagadnień inżynierii złożowej. Polega ona na wielokrotnym powtarzaniu sejsmicznych zdjęć trójwymiarowych na złożu. Zdjęcia 4D mają na celu monitorowanie złoża poprzez analizę w czasie uzyskanych zdjęć. Wykonywanie takich badań ma sens na obszarach złóż ropy i gazu, jak również podziemnych magazynów węglowodorów. Analiza zmienności cech sygnału sejsmicznych w czasie może dostarczyć wielu cennych i ciekawych informacji.

Technologia pomiarów 4D polega na cyklicznym wykonywaniu badań 3D o takich samych parametrach metodycznych w różnych fazach eksploatacji złoża i różnych fazach napełnienia podziemnych magazynów ropy lub gazu z użyciem zastabilizowanych punktów odbioru, a następnie porównywaniu wyników kolejnych zdjęć 3D i analizie identityczności lub rozbieżności charakterystycznych cech rejestrowanego sygnału sejsmicznego.

Analizując kierunki rozwoju sejsmiki 3D należałoby się zastanowić, jak się potoczą dalszy losy tej metody w przyszłości. Będzie on zależny od nowych zadań stawianych przed sejsmiką oraz będzie powiązany z rozwojem technologicznym.

Obecnie pracuje się nad odejściem od regularności siatki punktów wzbudzenia i odbioru. Kolejne etapy, to poprawa rozdzielczości obrazu sejsmicznego oraz Pseudo-Random 3D.

Wyższym etapem ewolucji sejsmiki 3D będzie tzw. sejsmika Random-3D, co na język polski można przetłumaczyć jako: sejsmika 3D o schematach dowolnych. Metoda ta będzie polegała na tym, że punkty wzbudzenia i odbioru będą sytuowane w sposób dowolny, swobodny, przypadkowy, losowy, wyrwykowy, na chybił trafił, bez trzymancia się założonej siatki. W sejsmice o schematach dowolnych (Random-3D) punkt wzbudzenia będzie lokalizowany w geometrycznym środku ciężkości punktów odbioru tak, aby rozkład azymutów i offsetów tras był jak najbardziej równomierny. Lokalizowanie punktów wzbudzenia będzie się odbywała za pomocą specjalnych systemów komputerowych. Już dzisiaj renomowane firmy produkujące sprzęt sejsmiczny, jak m.in. *Input/Output Inc.*, przygotowują się do wprowadzenia tej metody. Dowiązanie geodezyjne usytuowanych punktów będzie się odbywało w oparciu o nawigację satelitarną (GPS). Wydaje mi się, że sejsmika Random-3D nie wchodzi jeszcze do produkcji z dwóch powodów:

Po pierwsze, to przyczyny typowo komercyjne, spowalniające prezentację na rynku nowych metod, ponieważ upłynął zbyt krótki czas od wprowadzenia na rynek sejsmiki 3D, nazwijmy ją klasycznej. Na technologii 3D firmy produkujące sprzęt oraz oferujące usługi poszukiwawcze mogą jeszcze sporo zarobić. Gdy przyjdzie na to czas lub pojawi się zbyt liczna konkurencja, prawdopodobnie technologia Random-3D zostanie wprowadzona na rynek. Trwają już prace koncepcyjne, w laboratoriach bada się możliwości sprzętowe zastosowania do tej metody. Może prowadzi się już bez rozgłosu i w tajemnicy przed konkurencją jakieś próbne polowe prace doświadczalne, o wynikach których już może niedługo dowie się świat;

Drugi powód, to prawdopodobnie brak odpowiedniego *software'u* lub *hardware'u*, spełniającego wymogi tej metody. Informatyka i elektronika to dziedziny, w których postęp jest najszybszy i można się spodziewać, że ograniczenia spowodowane niedomogami *software'u* i *hardware'u* w tym zakresie zostaną wkrótce zniesione. Wówczas będzie można się spodziewać, że Random-3D pojawi się w wersji przemysłowej.

Zastosowanie sejsmiki Random-3D pozwoli uniknąć kłopotów z lokalizacją w terenie punktów wzbudzenia i punktów odbioru. Jest to niebagatelna sprawa dla organizacji pracy grup sejsmicznych.

Należy się zastanowić, jak potoczą się losy sejsmiki, gdy na rynku, jako metoda przemysłowa, znajdzie się już sejsmika Random-3D.

Już dziś praktycy z zakresu sejsmiki głowią się nad tym co będzie stanowiło kolejny wymiar sejsmiki N — wymiarowej. Czy idea rozszerzenia sejsmiki o kolejny wymiar powyżej 4 jest realna? Na pewno tak. Mówi się już o sejsmice 9D, która będzie polegała na rejestracji 9 składowych, tj.

- 3 składowych, jak w 3D,
- rejestracji fali S i P,
- określeniu anizotropii ośrodka w celu eliminacji szczelinowatości,
- pomiaru prędkości fali P i S do oszacowania porowatości.

Inny trend w rozwoju nowoczesnej sejsmiki będzie związany z rejestracją fal odbitych i fali prostej, prześwietlającej górotwór. Należy sobie zdać sprawę z tego, że interpretacja będzie związana z analizą przebiegu czoła fali w

czasie i przestrzeni. Punkty odbioru i wzbudzenia ustawić można będzie w sposób dowolny, podobnie jak w Random-3D. Natomiast do rozmieszczenia rozstawu w kierunku osi Z użyć można coraz liczniejsze głębokie otwory wiertnicze. Do tych otworów może być zapuszczana sonda stanowiąca rozstaw sejsmiczny, skonstruowana podobnie jak współczesne sondy karotażowe. Na obszarze zdjęcia Wierchostawice — 3D, wykonanego przez Zakład Geofizyka Kraków, o powierzchni ok. 36 km<sup>2</sup> znajdowało się ok. 25 głębokich otworów. Dodatkowo w jego najbliższym sąsiedztwie znajdowało się dalszych 25 otworów. Stąd wniosek, że wykorzystanie głębokich otworów do tego celu może okazać się realne już w niedalekiej przyszłości.

Rozszerzenie metody 3D o dodatkowy wymiar będzie wymagało jedynie dostosowania dzisiejszych definicji z zakresu sejsmiki do nowych wymagań. Zamiast powierzchni jednostkowej zostanie wprowadzona jednostkowa przestrzeń, którą na podobieństwo binów można by nazwać kubikiem. Być może będzie możliwe wykonanie przetwarzania zarejestrowanych danych dla tak sformułowanego zadania. Jedynym ograniczeniem w chwili obecnej jest brak superszybkich komputerów o bardzo dużych zasobach pamięci i znikomym czasie dostępu, które spełniałyby wymogi tej metody. Wydaje się, że ograniczenia softwareowe nie powinny stanowić tutaj większych trudności. Wyobraźnia ludzka nie zna granic, a gdy pojawią się potrzeby zbudowania programów do przetworzenia tych danych, to w niedługim czasie problem zastosowania rozwiniętych metod sejsmicznych zostanie rozwiązany. Wydaje mi się, że wieloekranowe stacje interaktywne do interpretacji tych danych mogą okazać się niewystarczające i trzeba będzie szukać innych rozwiązań. Pomocnym w tym zakresie może okazać się zastosowanie holografii w systemach komputerowych, tworzenie holograficznych obrazów przestrzennych z użyciem światła laserowego, a także tzw. rzeczywistość wirtualna. Czy będą to technologie możliwe do zastosowania jeszcze w tym wieku? Tego chyba nikt dzisiaj nie jest w stanie określić, choć wszyscy zdają sobie sprawę z tego, że postęp w elektronice, informatyce i dziedzinach, które znajdują zastosowanie w sejsmice, jest ogromny. Chociaż ta idea nie jest oderwana od rzeczywistości, to zdają sobie sprawę z tego, że według obecnego stanu techniki nie jest jeszcze możliwa do zastosowania.

## Literatura

- BAK E. 1971 — Geofizyka i Geologia Naftowa, Biuletyn Specjalny z okazji 15-lecia Przedsiębiorstwa Geofizyki Górnictwa Naftowego w Krakowie, Wyd. PGGN, Kraków, 171: 1–24.
- GOODFELLOW K. 1991 — Geophysics, 11: 45–72.
- HEILAND C. A. 1936 — Ibidem, 1/2: 257–270.
- KISŁOW A. 1976 — Geofizyka dla nafty do 1956 r. Biuletyn z okazji 20-lecia Przedsiębiorstwa Geofizyki Górnictwa Naftowego w Krakowie. Kraków.
- MITERA Z. A. 1938 — Geophysics, 3: 225–233.
- PTAK A. 1996 — Mat. Konferencyjne. Konferencja Naukowo-Techniczna 10–11.10.1996. Arch. PGNiG SA w Warszawie, Oddz. Geofizyka Kraków: 21–26.
- SOJKA K. 1996 — Ibidem: 1–5.
- ROBERTSON J. D. 1989 — Geophysics, 2: 25–31.
- TRZEŚNIEWSKI Z. 1996 — Optymalizacja schematów obserwacji w sejsmice trójwymiarowej. Rozprawa doktorska. Biblioteka Główna AGH.