4. Zarys metodologii dwu i trójwymiarowych [2D i 3D] modelowań parametrycznych

Przestrzenne (3D) komputerowe modelowania parametryczne – inaczej określane jako statyczne, rozwijają się niezwykle dynamicznie od około czterdziestu lat, osiągając coraz większe znaczenie w poszukiwaniach naftowych. Do pionierskich prac w tym zakresie należy zaliczyć wykonywane w latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych dwudziestego wieku w przekrojach, analogowo - komputerowe modelowania zmienności facjalnej złoża Hassi-Messaoud (Delhomme, Gianessi 1979). Teoretyczne podstawy współczesnych technik modelowania, początkowo stosowanych wyłącznie w górnictwie, dały prace G. Matherona (1963, 1970) oraz Journela i Huijbregtsa (1978), którzy opracowali podstawy geostatystyki – między innymi techniki krigingu oraz symulacji warunkowych (*Conditional Simulations*). W latach osiemdziesiątych znalazły one szerokie zastosowanie w naftowych analizach 2D, głównie kartograficznych.

W tym samym okresie za sprawą badaczy norweskich zaczęły się rozwijać stochastyczne modelowania obiektowe, rozwiązujące zagadnienia, strukturalne, facjalne i zbiornikowe złóż typu Brent (Haldorsen, MacDonald 1987). Szybki rozwój technik komputerowych u schyłku lat 80 pozwolił na stworzenie modeli 3D (Clementsen, et al. 1990). Także pod koniec lat osiemdziesiątych we Francji grupa badawcza Hereism, rozwijała techniki wykorzystujące modelowania oparte na funkcjach losowych, tzw. *truncated random functions.* (Dubrule 1998). W tym samym czasie na Uniwersytecie Standforda zaczęto rozwijać techniki modelowań stochastyczych, obejmujące symulacje wskaźnikowe *(indicator simulations)* oraz sekwencyjne *(sequential simulations)* (Journel, Gomez-Hernandez 1989). Wyniki tych prac udostępniono w formie ogólnodostępnej biblioteki GSLIB (Deutsch, Journel 1992, 1998).

W połowie lat 90 zaniknęła istniejąca dotychczas dychotomia pomiędzy dwuwymiarowymi modelowaniami powierzchni (gridy 2D) i trójwymiarowymi modelowaniami zmienności petrofizycznej (gridy 3D). Stało się tak, za sprawą rozwoju specjalistycznego oprogramowania stosowanego do modelowań 3D (Dubrule 2003). Czynnik ten umożliwił również podniesienie jakości modelowania 3D, m. in., dzięki pojawieniu się technik tzw. co-krigingu, integrujących modele 2D i 3D, a przede wszystkim różne rodzaje danych wejściowych, takich jak np. dane sejsmiczne, petrofizyczne i laboratoryjne oraz modelowania stochastyczne i deterministyczne (np. Doyen 1988, Xu et al. 1992, Hass, Dubrule 1994, Doyen et al. 1996).

Współczesne trendy rozwoju programów do modelowań 3D obejmują dalsze pogłębianie integracji pomiędzy poszczególnymi typami danych, zwłaszcza coraz pełniejsze wykorzystanie geofizyki (Dubrule 2003), a także niezwykle istotne z punktu widzenia ekonomiki poszukiwań modelowanie ryzyka - Uncertinity modeling, związanego z ograniczoną dokładnością interpretacji

sejsmiki, modelowania prędkości czy też własności zbiornikowych (Omre et al 1993, Lia et al. 1997, Chilès, Delfiner 1999, Abrahamsen et al, 1991, 2000, Thore et al. 2002). W pierwszej dekadzie obecnego dziesięciolecia powszechnym trendem stała się również integracja modelowań statycznych i dynamicznych w obrębie jednego pakietu oprogramowania. Takie możliwości stwarzają obecnie m.in systemy Petrel (Schlumberger), DecisionSpace (Halliburton), GoCad (Paradigm) i wiele innych. Do silnie rozwijanych kierunków należy ocena połączonego ryzyka (dokładności) modelu statycznego i dynamicznego (Dubrule et al. 2001 Charles at al.2001, Corre et al.2002), bazująca na teoretycznych podstawach probabilistycznych metod szacowania zasobów (Swinkles 2001, Heidberg, Swinkles 2001, Ross 2001, Gouveia. at al.2003).

4.1 Schemat modelowania 3D

Współcześnie używane oprogramowanie komputerowe prezentuje urozmaicony sposób konstrukcji modeli przestrzennych (3D). Obok oprogramowania bazującego na idei gridów 3D, budowanych na podstawie regularnych siatek interpolacyjnych- gridów 2D (Tipper 1992, Cosetino 2001, Dubrule 1998, 2003, więcej rozdz. 4.5), istnieją programy należące do rodziny CAD, jak program GoCad, w których osnowa stratygraficzna budowana jest w oparciu o parametryczne powierzchnie, które dla jedne lokalizacji X, Y mogą wykazywać więcej niż jedną wartość Z, a budowa modelu przestrzennego wykorzystuje algorytm Discrete Smooth Interpolation (Mallet 2002, Mallet 2008). W praktyce badawczej pełen zakres czynności niezbędnych do opracowania statycznego modelu w formie grida 3D jest niezwykle szeroki i w przypadku zastosowania kompletnej procedury interpretacyjnej obejmuje on następujące zasadnicze etapy prac:

- opracowanie bazy danych otworowych oraz wykonanie geologicznej, geofizycznej i litologiczno-złożowej interpretacji profili wierceń 1D;
- interpretacja danych sejsmicznych (2D lub 3D) w domenie czasowej i ich konwersja czasowo-głębokościowa (opcjonalne);
- opracowanie map strukturalnych w formacie regularnych siatek interpolacyjnych (RSI, gridów 2D) na podstawie danych:
 - sejsmicznych, po ich dowiązaniu do profili wierceń;
 - cyfrowanych map archiwalnych i danych otworowych;
 - danych otworowych (na ogół tylko mapy prędkości średnich bądź interwałowych w

przypadku potrzeby dokonania konwersji czasowo głębokościowej.

- stworzenie przestrzennego (3D) modelu strukturalnego z wykorzystaniem opracowanych RSI i interpretacji tektoniki nieciągłej:
 - utworzenie sekwencji stratygraficznych (Sequence, Zone) wraz z dyslokacjami;
 - wprowadzenie warstwowania wewnątrz sekwencji stratygraficznych (*layers*);
- utworzenie modelu facjalnego lub litologicznego na podstawie danych otworowych:
 - uśrednienie danych litologicznych w profilach otworów (wells upscaling, well model);

- przestrzenne modelowanie zmienności facjalnej w wydzielonych sekwencjach i warstwach, z zastosowaniem algorytmów deterministycznych bądź stochastycznych;
- wykorzystanie interpretacji sejsmiki i atrybutów sejsmicznych (sejsmika 2D i 3D) do interpretacji strukturalno-tektonicznej i 3D modelowania wewnętrznej zmienności parametrów fizycznych ośrodka skalnego;
- modelowanie zmienności parametrów petrofizycznych (porowatości, zailenia przepuszczalności) z wykorzystaniem wyników modelowań strukturalnych i litologiczno-facjalnych:
 - tworzenie podstawowych modeli jak np. modele porowatości i zailenia dla poszczególnych sekwencji i litologii;
 - tworzenie modeli pochodnych, takich jak np. jakość uszczelnień czy jakość skał zbiornikowych w sekwencjach stratygraficznych.

Wyniki modelowania 3D można przedstawiać w postaci rysunków pseudo trójwymiarowych – map i tzw. diagramów płotowych (*fence diagrams*) bądź w formie dwuwymiarowych map odzwierciedlających uśrednione wartości wybranych parametrów i sekwencji/warstw/facji.

Osiągnięcie zadowalających jakościowo rezultatów modelowania 3D jest możliwe w zasadzie wyłącznie przy użyciu specjalistycznego oprogramowania obejmującego szereg modułów interpretacyjnych, funkcjonujących jako samodzielne programy lub skupionych w pakiety. Przykładowo w przypadku wykorzystania oprogramowania firmy Schlumberger, moduły umożliwiające wykonanie wszystkich wyżej wymienionych kroków modelowania kryją w pakiecie Petrel [1].

W przypadku wykorzystaniem oprogramowania firmy Landmark Graphics Corporation, poszczególne etapy procedury wymagają zastosowania specjalistycznego oprogramowania interpretacyjnego obejmującego następujące moduły:

- **OpenWorks** (zarządzanie danymi) [2];
- PetroWorks, StratWorks obróbka danych 1D [3,4];
- Rave statystyczna obróbka danych [5];
- SeisWorks, Syntool interpretacja sejsmiki 2D [6];
- ZmapPlus opracowania map granic sekwencji sejsmicznych w domenie czasowej, opracowanie map prędkości średnich i interwałowych, konwersja czasowo głębokościowa oraz opracowanie ciągłych map głębokościowych stanowiących granice sekwencji czyli podstawowe elementy osnowy stratygraficznej modelu [7];
- StrataModel Utworzenie modelu 3D, modelowanie zmienności litologicznej oraz przestrzennej zmienności parametrów petrofizycznych w "funkcji" zmienności stratygraficznej i litologicznej [8], bądź wprowadzany w ostatnich latach program DecisionSpace.

4.2 Podstawowe etapy tworzenia modelu 3D

4.2.1 Osnowa strukturalna modelu

Przestrzenny model geologiczny składa się z wielościanów, najczęściej nieregularnych konstruowanych na bazie zniekształconego równoległoboku¹ (Rys.4.1). Przeciętny model statyczny obejmuje współcześnie ok. 1 000 000 komórek (Dubrule 2003). Filozofia tworzenia osnowy stratygraficznej modelu może być bardzo różnorodna, niżej przedstawione zostaną dwa podejścia do tego zagadnienie stosowane do opracowania modeli w programach Petrel [1] StrataModel [8]. W przedstawianej pracy wykorzystano modele opracowane w obu wymienionych systemach, choć należy podkreślić, że modele opracowane w programie Petrel (Pałkowska 2008, Ozimek 2008) stosowano w ograniczonym zakresie, gdyż oprogramowanie to znalazło się w posiadaniu WGGiOŚ dopiero w połowie 2007 roku.

Model w programie Petrel

W filozofii modelowania reprezentowanej przez autorów programu Petrel pierwszy krok stanowi stworzenie przestrzennego modelu dyslokacji (*fault model*) na obszarze badań (Rys 4.1, 4.2a) Umożliwia on założenie zarysu pierwotnego gridu 3D obejmującego kolumny (*pillars*) rozciągnięte równolegle do przebiegu dyslokacji między powierzchnią stropową i spągową modelu między trzema powierzchniami szkieletowymi (*skeleton*) powiązanymi z przebiegiem uskoków za pośrednictwem górnego, środkowego i dolnego punktu kształtującego. Procedura ta jest określana jako, tzw. *pillar gridding* (Rys.4.1, 4.2b). Utworzone komórki *pillar gridu* mają w płaszczyźnie XY nieregularny kształt determinowany przebiegiem dyslokacjii i całkowitą dostępną przestrzenią modelowania.

Kolejnym krokiem jest wprowadzenie do modelu tzw. horyzontów (Rys.*.4.2c) czyli granic geologicznych powstałych z przekształcenia tzw. powierzchni (*surfaces*), najczęściej regularnych siatek interpolacyjnych, RSI (=*gridów 2D*), obliczonych w Petrelu na podstawie wyników interpretacji sejsmiki i/lub danych otworowych (*well tops*), bądź importowanych w formie RSI obliczonych w programach Zmap+, CPS-3, IRAP, EarthVision. Horyzonty stanowią podstawowe składniki osnowy geometrycznej modelu strukturalnego, tzw. *structural framework*.

¹ W wielu wypadkach na czas estymacji parametrów zbiornikowych model 3D złożony z komórek o nieregularnych kształtach, bywa przekształcany w regularną siatkę zbudowaną z równolegloboków, tzw. voxli (Dubrule 1998). Siatka taka, nazywana Simbox [1], ułatwia działanie procedur obliczeniowych.



Rys.4.2 Zasadnicze etapy opracowania osnowy strukturalnej przestrzennego modelu (3D) geologicznego w programie Petrel (na podstawie materiałów firmy Schlumberger [1])

Pomiędzy, tak utworzone horyzonty można wprowadzać kolejne granice sekwencji stratygraficznych (*zones*), np. obliczane metodami "superpozycyjnymi" (Rys.4.2d) przez odjęcie modeli miąższości kolejnych warstw. W obrębie sekwencji można wprowadzić także sekwencje niższego rzędu (*sub-zones*).

Finalny etap budowy osnowy stratygraficznej modelu stanowi wprowadzenie warstw (*layers*). Ich miąższość zawsze stanowi kompromis pomiędzy rozdzielczością oraz ilością danych wejściowych, a rozdzielczością modelu i jego całkowitą kubaturą. Miąższość warstw w poszczególnych sekwencjach można różnicować, biorąc pod uwagę miąższość sekwencji, a także jej znaczenie dla poszukiwań naftowych. Warstwy można wyznaczyć w sposób:

- proporcjonalny (proportional layering) wyznaczając stałą ilość warstw w całej sekwencji (zone);
- równolegle do stropu sekwencji, zachowując stałą miąższość warstw;
- równolegle do spągu sekwencji, zachowując stałą miąższość warstw;
- stosując warstwowanie ułamkowe (wyznaczając stałą proporcję poszczególnych warstw względem miąższości całej sekwencji stratygraficznej.

Model w programie StrataModel



Modele parametryczne opracowane w programie StrataModel opierają się na znacząco odmiennym

Rys.4.3 Import i reprocesing siatek interpolacyjnych tworzących osnowę stratygraficzną modelu 3D w programie StrataModel

podejściu do modelowania 3D. Składają się one z różnych odmian siatek interpolacyjnych (grid), zdarzeń (event), sekwencji (sequence) i warstw (layer).

Regularne siatki interpolacyjne (RSI)

Podstawą wszelkich modelowań 3D w programie StrataModel [SGM] jest dwuwymiarowa RSI (grid 2D), odzwierciedlająca granicę sekwencji, a w przypadku modeli nieciągłych, także ukształtowanie powierzchni uskokowej. Program akceptuje siatki strukturalne i miąższościowe obliczone w programie ZMAP+, a także estymowane w wewnętrznym module kartograficznym SGM, programie *Stratmap*. RSI używane do stworzenia osnowy stratygraficznej, dzielą się na siatki pierwotne (*naive grids*) oraz bardziej przetworzone siatki ograniczone (*limited grids*).

RSI pierwotne na ogół nie honorują istotnych informacji geologicznych takich jak istnienie

uskoków, stref wyklinowań czy obszarów erozji. Siatki pierwotne, pokrywające cały obszar badań, jego wycinki lub odzwierciedlające wykształcenie powierzchni uskokowych są najczęściej używaną postacią map (modeli) wejściowych, które w prosty sposób można przekształcać w siatki ograniczone (*limited grids*), dopasowane do zjawisk geologicznych obecnych na obszarze badań.

Rysunki 4.3a i b pokazują w jaki sposób można przekształcić pierwotne RSI 1,2 (stanowią granice sekwencji) w siatki ograniczone, w wyniku ich przecięcia z siatką interpolacyjną odzwierciedlającą wykształcenie powierzchni niezgodności (RSI 3, pierwotna).

Sposób wprowadzenia do modelu 3D uskoków przedstawia Rys.4.3c. Duża powierzchnia uskokowa jest wprowadzona jako ograniczona RSI 3, obcięta na powierzchni niezgodności kątowej



(RSI 6). Pozostałe RSI budujące granice sekwencji (1,2,4,5) również są gridami ograniczonymi, obciętymi na uskoku (siatki 1,2) bądź na uskoku i powierzchni niezgodności (siatki 4,5)

Na rysunku 4.3c widoczne są dyslokacje pionowe A i B o niewielkim zrzucie. W praktyce ich obecność w modelu przejawia się tylko poprzez ugięcie siatek 1, 2, 3, 5, które przeprowadzono na etapie estymacji wejściowych siatek powierzchni strukturalnych.

Rys.4.4 Schemat tworzenia sekwencji stratygraficznej w programie StrataModel

Zdarzenia, sekwencje, warstwowanie (Events, sequences, layering)

Siatki pierwotne i ograniczone ułożone w odpowiedniej kolejności są przekształcane w zdarzenia (*events*), uporządkowane pod względem wieku (Rys.4.4.a) oddzielnie dla każdego bloku uskokowego. Zdarzenie nr 1 odpowiada najstarszej granicy (RSI) modelu, a zdarzenie o najwyższym numerze odpowiada najmłodszej powierzchni. Wyróżnione zdarzenia stanowią granice sekwencji. Rysunek 4.4b pokazuje, że w przypadku występowania dużych uskoków budowa model staje się bardzo złożona. Widoczne na diagramie sekwencje 1 - 6 w istocie stanowią trzy zdyslokowane kompleksy geologiczne, które dla celów modelowania z uwzględnieniem nieciągłości muszą być zduplikowane z powodu podziału modelu na dwa bloki uskokowe (*Fault Blocks*).

Ostatnim etapem przygotowania osnowy stratygraficznej modelu 3D, jest podział sekwencji na warstwy. W programie SGM wyróżnianych jest pięć podstawowych typów sekwencji, pozwalających dopasować wewnętrzną zmienność jednostek do rzeczywistej zmienności geologicznej:

- niezależna (Independent);
- przekraczająca i wyklinowana (Onlap and Offlap);
- proporcjonalna (*Proportional*);
- ścięta erozyjnie (Truncation);
- uskok (Fault);



Rys.4.5 Sekwencja niezależna (independet)

W sekwencji typu przekraczającego (*onlap* lub *offlap*) warstwy mają stałą miąższość i przebiegają równolegle do stropu, wyklinowując się na powierzchni spągowej (Rys.4.6). Jest to typowy sposób wprowadzania do modelu sekwencji transgersywnych.



Rys.4.7 Sekwencja o warstwowaniu opcjonalnym

odejmowane lub dodawane są warstwy o stałej miąższości. Granice poszczególnych warstw powstają w wyniku intersekcji granic warstw i sekwencji (Rys.4.7).

Wyznaczając sekwencję o warstwowaniu proporcjonalnym W sekwencji niezależnej *(independent)* warstwy mają stałą miąższość i są odejmowane od stropu jednostki (Rys.4.5). W modelu może być tylko jedna sekwencja niezależna. Na ogół jest ona położona w spągowej partii modelu.



Rys.4.6 Wyklinowanie jednostek na spągu sekwencj

W warstwach, które nie spełniają wyłącznych warunków sekwencji typu offlap lub onlap możliwe jest wprowadzenie tzw sekwencji opcjonalnych, gdzie w środek sekwencji wprowadzana jest siatka interpolacyjna będąca tzw. gridem depozycyjnym. Od tei powierzchni



Rys.4.8 Sekwencja o warstwowaniu proporcjonalnym (*Proportional*)

użytkownik określa tylko ilość warstw na jaką ma być podzielona cała sekwencja. Miąższość poszczególnych warstw jest więc uzależniona od całkowitej miąższości sekwencji. Zmiany miąższości warstw w poszczególnych kompleksach odzwierciedlają w tym typie sekwencji zmiany tempa depozycji (Rys.4.8).





zastosować warstwowanie typu *Truncated*. Warstwy mają wówczas stałą miąższość, dodawaną do spągu sekwencji. Na powierzchni stropu zasięg poszczególnych warstw jest wyznaczony intersekcyjnie (Rys.4.9).

Rys.4.9 Sekwencja ścięta erozyjnie (runcated)

Jeżeli sekwencja stratygraficzna jest rozcięta i ograniczona uskokiem wówczas należy w niej zastosować warstwowanie typu *Fault*. W przykładzie pokazanym na rysunku 4.10 powierzchnia Event 1 odpowiada spągowi Sekwencji 1, a uskok jest powierzchnią (=zdarzeniem) Event 2,

częściowo stanowiącą strop Sekwencji 2. Wewnętrzne "uwarstwienie" sekwencji obejmuje warstwy o stałej miąższości, dodawane do spągu. Zasięg warstw na kontakcie z uskokiem (Event 2) jest wyznaczony intersekcyjnie.



Rys.4.10 Sekwencja o warstwowaniu typu uskok(fault)

Komórki modelu 3D

Trójwymiarowa siatka interpolacyjna, powstała w wyniku zastosowania wyżej opisanej procedury modelowania przeciętnie składa się z ok, 1 000 000 komórek, a do każdej z nich w SGM



może przypisać do 50 atrybutów. Komórki tworzące siatkę, zawsze mają postać pionowo zorientowanych równoległoboków o osiach XYZ. Pionowa orientacja komórek jest niezależna od kąta nachylenia warstw (Rys.4.11). W strefach wyklinowania i przyuskokowych komórki są zniekształcone – stanowią zmienną część równoległoboku, nie tracą jednak pionowej orientacji ścian w osi Z.

Rys. 4.11 Orientacja komórek grida 3D w modelu StrataModel

Po zakończeniu procedury wprowadzania warstw do osnowy stratygraficznej grid 3D, staje się tzw. modelem

stratygraficznym, w którym każda komórka oprócz współrzędnych prostokątnych XYZ, ma położenie zdefiniowne przez tzw. współrzędne stratygraficzne I,J,K, które mogą być zrotowane względem współrzędnych X,Y, Z. (Dubrule 2003, [1]). Współrzędne stratygraficzne są używane, także wtedy, gdy model statyczny jest przekształcany w model dynamiczny umożliwiający symulację przepływów.

4.2.3 Model parametryczny rejonu Proszowice - Busko - Pińczów [P-B-P].

Analizowany w pracy model strukturalno – geologiczny ma powierzchnię ok. 1200 km² i obejmuje w przybliżeniu prostokątny fragment niecki miechowskiej położony w rejonie miast Proszowice – Busko – Pińczów. Obejmuje on dziewięć dużych sekwencji stratygraficznych. Dodatkowo w rejonie uskoku inwersyjnego Kostek Małych wprowadzoną jedną sekwencję lokalną. Model oparto na obiektach typu grid pierwotny, a w mniejszym stopniu na gridach ograniczonych. W większości sekwencji uniknięto konieczności ograniczania RSI, gdyż w strefach wyklinowania nie eliminowano ("blankowano") modelu lecz wprowadzano miąższość wynoszącą zero. W rezultacie zerodowane fragmenty powierzchni strukturalnych zastąpiono wycinkami starszych granic strukturalnych. Do budowy osnowy stratygraficznej modelu można było wykorzystać RSI pierwotne, także dlatego, że do jego opracowania nie stosowano uskoków, pomimo tego, że pierwotne mapy strukturalne w domenie czasowej i mapy prędkości uwzględniają obecność najważniejszych dyslokacji regionalnych. Decyzja o usunięciu dyslokacji uwzględniała następujące czynniki:

- model skonstruowano jako regionalny model statyczny, którego zadaniem jest odzwierciedlenie przestrzennych relacji potencjalnych skał zbiornikowych i uszczelniających;
- duża powierzchnia obszaru badań (rzędu 1200 km²) oraz znaczna ilość (dziewięć) sekwencji stratygraficznych objętych modelowaniem wymusiły ograniczenie szczegółowości. Duża rozciągłość pionowa i lateralna skorelowanych dyslokacji, obecność dwóch uskoków inwersyjnych oraz wymogi programu StrataModel, powodują, że opracowanie "zdyslokowanej" osnowy stratygraficznej wymagaloby wydzielenia ok. 50 sekwencji stratygraficznych. Z jednej strony skomplikowało by to nadmiernie proces konstruowania osnowy, a z drugiej, ze względu na ograniczoną ilość danych wejściowych bardzo ograniczyłoby wiarygodność modelu, gdyż w tej sytuacji znaczna część wydzielonych sekwencji nie miałaby żadnej kontroli otworowej. Nie bez znaczenia byłoby też drastyczne wydłużenie wszystkich procedur obliczeniowych.

4.3 Model danych otworach (Upscaling/Well model)

Pierwszy etap przekształcania osnowy strukturalnej w model litologiczno - zbiornikowy stanowi utworzenie tzw. modelu otworowego [8]) czy inaczej *upscaling* danych otworowych [1], (Dubrule 2003) do postaci komórek (*cells*) rozlokowanych wzdłuż trajektorii wierceń. W płaszczyźnie pionowej ilości komórek modelu otworowego jest uzależniona od gęstości warstwowania (*layering*) poszczególnych sekwencji (*sequences, zones*) stratygraficznych modelu 3D. Dane wykorzystywane do stworzenia modelu otworowego obejmują ciągłe krzywe geofizyczne, nieregularnie rozmieszczone w profilu otworu dane laboratoryjne, a także dane dyskretne, takie jak zakodowana cyfrowo litologia, zmienność facjalna czy stratygrafia. Importowane do modelu dane mają postać krzywych geofizycznych (format "las" lub "lis") bądź odpowiednio formatowanych plików tekstowych ASCII.

Standardowe procedury *upscaling'u* obejmują szereg technik uśredniania. Do najprostszych, często stosowanych technik uśredniania należy metoda **średniej arytmetycznej.** Jest wykorzystywana szczególnie do przetwarzania zbiorów danych o dużej liczebności, wykazujących ciągłą zmienność, takich jak np. zailenie czy porowatość, a znacznie rzadziej przepuszczalność. Średnia arytmetyczna liczona jest z formuły:

$$\mathbb{P}_{\mathbb{A}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \mathbb{P}_{i}$$

Arytmetyczna średnia ważona jest stosowana względem tzw. danych liniowych czyli wykazujących równomierne próbkowanie, jak np. krzywe geofizyczne. Na ogół jako waga wykorzystywany jest dystans (MD) pomiędzy poszczególnymi próbkami w obrębie komórki czyli w praktyce miąższość atrybutu o danej wielkości. AŚW liczona jest z zastosowaniem formuły:

$$P_{A} = \left(\frac{\sum_{n} W_{i}P_{i}}{\sum_{n} W_{i}}\right) a$$

Gdzie: W_i to wielkość ważąca, np. miąższość facji w obrębie komórki, a P_i uśredniany parametr.

Metoda średniej harmonicznej jest stosowana do uśredniania pionowej przepuszczalności efektywnej, gdy skała zbiornikowa składa się z naprzemianległych warstewek o jednorodnej przepuszczalności. Istotną zaletą opisywanej metody jest czułość na warstwy niskich wartościach przepuszczalności (Warren, Price 1961, Ahmed 2001, Cosentino 2001). Zastosowanie tej metody daje dobre rezultaty, gdy uśredniany parametr wykazuje lognormalny rozkład zmienności.

$$P_{A} = \left(\frac{\sum P_{i}^{-1}}{N}\right)^{-1}$$

Dane uśredniane w ten sposób nie mogą zawierać wartości ujemnych.

Metoda **ważonej średniej harmonicznej** jest stosowana, gdy uśredniane parametry mają zmienną liczebność w obrębie komórek. Podobnie jak w przypadku ważonej średniej arytmetycznej, jako waga wykorzystywany jest dystans (MD) pomiędzy próbkami w obrębie komórki.

$$\mathbb{P}_{\mathbb{A}} = \left(\frac{\displaystyle\sum_{n} \mathbb{W}_{i} \mathbb{P}_{i}^{-1}}{\displaystyle\sum_{n} \mathbb{W}_{i}}\right)^{-1}$$

gdzie W_i to wielkość ważąca, np. miąższość facji w obrębie komórki, a P_i uśredniany parametr.

Metodę **średniej geometrycznej** stosuje się dla obliczania przepuszczalności gdy parametr ten nie wykazuje korelacji przestrzennej (Warren, Price 1961, Ahmed 2001, Cosentino 2001) oraz wykazuje zmienność lognormalną. Średnia geometryczna jest obliczana z równania:

$$\mathbf{P}_{\mathbf{A}} = \left(\prod_{i=1}^{N} \mathbf{P}_{i}\right)^{\frac{1}{N}}$$

Dla danych wykazujących nierównomierne odległości w obrębie komórek stosowana bywa metoda **ważonej średniej geometrycznej.** Obydwie metody geometryczne nie mogą być wykorzystywanie dla danych obejmujących wartości ujemne.

Metoda *RMS (Root Mean Square)* polega na uśrednianiu danych w komórkach w sposób opisany przez poniższe równanie:

$$\mathbb{P}_{\mathbb{A}} = \sqrt{\frac{\mathbb{X}_1^2 + \mathbb{X}_2^2 + \ldots + \mathbb{X}_n^2}{n}}$$

Uśrednianie metodą RMS powoduje systematyczne zawyżanie uzyskanych wyników.

Metoda *Minimum* polega na przypisaniu do komórki najniższej wartości parametru z populacji próbek wpadających w obręb komórki modelu otworowego. Podobnie działa uśrednianie metodą *Maximum*, które jednak powoduje przypisanie do komórki **najwyższej** wartości parametru.

Dla warstw o znacznej miąższości oraz stosunkowo licznym zbiorze danych wykazującym zmienność normalną (także danych dyskretnych) wiarygodne wyniki można uzyskać stosując uśrednianie **metodą medianową** (*Median*). Przykładowo, w przypadku, gdy uśrednianie medianowe odbywa się w komórce na podstawie siedmiu danych, po ich wysortowaniu pod względem wielkości program przypisuje komórce wartość jaką ma czwarta próbka w komórce [1,8].

Do *uspscaling'u* danych dyskretnych (przykładowo, tworzenia modelu litologicznego) można wykorzystać technikę uśrednia modalnego (*Most of*), która przypisuje komórce wartość najczęściej występującą (np. litologia 1) w próbkach znajdujących się w jej obrębie.

Dla licznych danych wykazujących zmienność losową, a jednocześnie stosunkowo niewielki zakres zmienności można tworzyć model otworowy wykazujący zmienność losową [1] (random).

4.4. Modelowanie zmienności litofacji i parametrów zbiornikowych

Wewnętrzną zmienność litologiczno – facjalną modelu 3D możną rekonstruować według dwóch podstawowych schematów. W prostszym zmienność litologiczna i facjalna oraz parametry zbiornikowe są modelowane niezależnie. Współcześnie, modelowanie własności ośrodka geologicznego najczęściej odbywa się jednak według schematu dwuetapowego. Pierwszym krokiem jest wówczas stworzenie modelu litologiczno-facjalnego, który wraz z wcześniej przyjętym typem warstwowania (*layering*) będzie w dalszej części sterował procesem interpolacji parametrów zbiornikowych. Niezależnie od przyjętego schematu modelowania, przestrzenna estymacja modelu

3D odbywa się "wzdłuż" wyznaczonych warstw (*layers*), według zasad interpolacji numerycznej znanych od lat 60-tych (patrz: Rozdz. 4.5).

4.4.1 Model litologiczno-facjalny

Model litologiczno - facjalny (bądź tylko litologiczny lub facjalny) jest konstruowany na podstawie bezpośrednich informacji geologicznych uzyskiwanych w trakcie wiercenia – zwiercin i rdzenia podlegających analizom chemicznym i petrograficznym. Wspomagającą, a często podstawową informację ilościową stanowią wyniki interpretacji litologiczno-facjalnej krzywych geofizycznych.

Dane litologiczne (facjalne) niezależnie od tego czy są to punktowe obserwacje laboratoryjne czy ciągły zapis krzywych geofizycznych, są przetwarzane w format danych dyskretnych, w którym poszczególne typy litologii, facji czy wydzielenia stratygraficzne są kodowane w postaci liczbowej. (Dubrule 1998, 2003, Papiernik, 2003, Papiernik, Zając 2003, Mastalerz et al. 2006).

Dyskretny format danych .litologicznych nakłada znaczące ograniczenia na proces interpolacji, nie można jej bowiem wykonać stosując ciągłe techniki obliczeniowe. Przykładowo, uśrednienie litologii zakodowanych jako 1 i 3 wprowadziłoby litologię o kodzie 2 tam, gdzie jej nie ma. By uniknąć tego rodzaju zafałszowań przestrzenne symulacje zmienności litologiczno - facjalnej są wykonywane specjalnie dostosowanymi algorytmami wskaźnikowymi - deterministycznymi bądź stochastycznymi.

Metoda najbliższego sąsiada należy do najprostszych deterministycznych technik obliczeniowych. Estymacja modelu litologiczno - facjalnego obejmuje dwa etapy. W pierwszym następuje podział przestrzeni modelu na zestaw wieloboków nazywanych poligonami Voronoia (PV) bądź Thiessena czy Dirichlet'a (Sibson 1981, Davis 1986, Watson 1992, Mallet 2002). Wieloboki te są często nazywane strefami wyłącznego wpływu danych (Rys.4.16e), gdyż oznaczają zasięg subregionów leżących najbliżej poszczególnych danych wejściowych. Końcowy etap obliczenia modelu polega na przypisaniu węzłom wpadającym w obręb poszczególnych poligonów Voronoia wartości danej znajdującej się w centrum wieloboku. Powstały model składa się z szeregu ostro ograniczonych bloków, przypominających nieregularne histogramy. Metoda ta, znana pod nazwami *Closest Point, Closest Neighbour, Nearest Neighbour, Polygon Fitting,* itp., bywa stosowana także do modelowania powierzchni 2D.

Do algorytmów deterministycznych używanych do modelowania zmienności facjalnej i litologicznej, zaliczymy także kriging wskaźnikowy (*Indicator Kriging*). Algorytm ten podobnie jak inne odmiany krigingu, opiera procedurę estymacji na współczynnikach ważących, określonych dla danego zbioru danych na podstawie tzw. semiwariogramu lub wariogramu eksperymentalnego i modelowanego (Rys.4.16, Rozdz.4.5). Kriging wskaźnikowy umożliwia tworzenie bardzo

wygładzonych modeli na podstawie danych dyskretnych (Deutsch, Journel 1992).

Bardziej zaawansowane są algorytmy stochastyczne, używane do obiektowego (*object-based*) bądź wskaźnikowego (*indicator*) modelowania zmienności litofacjalnej. Współcześnie wykorzystywane algorytmy stochastyczne do modelowania zmienności facjalnej lub litofacjalnej stosują podejście iteratywne, sekwencyjne lub bezpośrednie (Dubrule 1998).

W przypadku algorytmów iteracyjnych filozofia modelowania jest taka sama dla modeli obiektowych, jak i wskaźnikowych. Pierwszy obliczany model ma całkowicie losowy rozkład litologii (facji) i w trakcie kolejnych iteracji modelowane wartości są coraz lepiej dopasowane do wejściowych wartości granicznych (kształtu i geometrii obiektów, bądź obliczonych wariogramów wskaźnikowych, a także proporcji udziału poszczególnych facji). Różnica między modelowaniem obiektowym i wskaźnikowym polega na tym, że w pierwszym przypadku zmiany kolejnych iteracji są stosowane względem poszczególnych obiektów, a w drugim względem poszczególnych oczek *(voxelsi)* modelu 3D (Dubrule 1998).

Algorytmy sekwencyjne, takie jak *Sequential Indicator Simulation -SIS* ([1], Deutsch, Journel 1992) są stosowane z dużym powodzeniem zarówno w modelowaniach obiektowych, jak i wskaźnikowych. Procedura obliczeniowa polega na stopniowym wypełnianiu modelu 3D wartościami. W każdej sekwencji obliczeniowej estymowane wartości są zgodne z wejściowymi wartościami granicznymi (procentowy udział facji, średnia, wariogram). Sekwencyjna estymacja trwa do momentu, gdy wypełniony jest cały model (Dubrule 1998). W modelach estymowanych z użyciem algorytmu SIS każda wydzielona facja (litologia) jest modelowana oddzielnie. W trakcie liczenia kolejnych facji części modelu zajęte przez poprzednio symulowaną fację są zablokowane (nie są brane pod uwagę).

Algorytm bezpośrednie np. tzw. *Truncated Gaussian Functions*, (Ravenne, Beucher 1988, Rudkiewicz et al. 1990) polegają na wykonaniu symulacji spełniającej wymagania odpowiedniego wariogramu. Algorytmy takie są stosowane do obliczania zmienności litofacjalnej środowisk charakteryzujących się łagodnym przejściem między facjami, jak np. środowiska przybrzeżne czy deltowe. Przykładem algorytmu bezpośredniego zdaje się być dostępny w programie Petrel 2005, algorytm *Facies Transition Simulation*. Algorytmy bezpośrednie są stosowane tylko w przypadku modelowania wskaźnikowego (Dubrule 1998).

Do opracowania opisywanych dalej modeli litologicznych wykorzystano algorytm stochastyczny (*Stochastic*) dostępny w programie *StrataModel*. Jest on swoistą mieszankę techniki deterministycznej i stochastycznej. Do zdefiniowania otoczenia używanego do doboru danych wejściowych i późniejszej estymacji gridu, nie jest stosowany wariogram. Pierwszy etap estymacji modelu litologicznego w SGM stanowi całkowicie arbitralne zdefiniowanie sposobu doboru danych.

Użytkownik określa w tym etapie:

- maksymalny dystans wyszukiwania danych używanych do symulacji (Search Radius);
- ilość sektorów wyszukiwania danych oraz maksymalną dozwoloną ilość sektorów pustych (Sectors);
- preferowaną ilości danych na sektor (1-20);
- wtórny promień wyszukiwania (*Secondary Search Radius*) dla opcjonalnego wyeliminowania najodleglejszych danych w przypadku, gdy silnie zaburzają wynik estymacji;
- promień nadpisania (D*istance override*) definiujący maksymalną odległość danej od węzła siatki interpolacyjnej, dla której procedura wyszukiwania jest zastępowana doborem danej z najbliżej leżącego punktu dokumentacyjnego;
- parametru Random Seed liczbę startową dla generatora liczb losowych, umożliwiającą powtórzenie wyników "losowania".

Na podstawie zestawu danych zebranego w deterministycznie ustalonym obszarze wyszukiwania, SGM dla każdego węzła siatki buduje kumulatywną krzywą rozkładu prawdopodobieństwa, z której losuje możliwy wynik, warunkując prawdopodobieństwo wylosowania wartości odległością punktu dokumentacyjnego od danego węzła modelu. W rezultacie w rejonach bliskich wierceniu model jest stosunkowo jednorodny, a jego "losowość:" rośnie wraz z odległością od danych.

Modelowanie litologiczno - facjalne w SGM można wykonać dla całego modelu lub tylko dla wybranych warstw (*layer*). Dodatkowo wyniki modelowania można modyfikować, tak by dokładniej uwzględniały kierunki trendów geologicznych, wprowadzając współczynnik anizotropii, w terminologii SGM, tzw. *Bias*.

W prezentowanej pracy ze względu na stosunkowo znaczną powierzchnie modelu, dużą ilość wydzielonych warstw i jednocześnie względnie słabe rozpoznanie facjalne obszaru badań, wykonano wyłącznie modelowanie zmienności litologicznej wyróżnionych kompleksów, pomijając subtelne zmiany facjalne.

4.4.2 Modelowanie rozkładu parametrów zbiornikowych

Symulacja przestrzennej zmienności parametrów zbiornikowych stanowi ostatni etap konstruowania, trójwymiarowego modelu statycznego, nazywanego również modelem atrybutowym (*Attribute model,* [8]). Podstawowe parametry definiujące zmienność własności zbiornikowych ośrodka skalnego używane w modelowaniach 3D to:

- procentowy udziału składników litologicznych (np, zailenia, zapiaszczenia, czy też w węglanach, zailenia, udziału kalcytu i dolomitu, itp.), określany na podstawie analizy rdzenia i zwiercin; interpretacji litologicznych krzywych geofizycznych, W przepadku wykorzystania sejsmiki 3D doskonałymi danymi wejściowymi są tzw. atrybuty sejsmiczne;
- porowatość porowa i szczelinowa, liczona na podstawie danych laboratoryjnych (porometr helowy, porozymetr rtęciowy, itp.), profilowań geofizyki wiertniczej, czy też analizy

atrybutów sejsmicznych.

Wymienione parametry umożliwiają stworzenie podstawowej wersji modelu statycznego, pozwalającego na ilościową rekonstrukcję przestrzennego rozkładu potencjalnych skał zbiornikowych i uszczelniających. W sytuacji, gdy analizowany obszar obejmuje nagromadzenie węglowodorów, do najważniejszych modelowanych parametrów należy nasycenie przestrzeni porowej węglowodorami (*1-Sw*) obliczane z krzywych geofizycznych. Model tego parametru opcjonalnie może być dzielony na modele nasycenia przestrzeni porowej ropą i gazem. (Cosetino 2001, Papiernik, Machowski 2007).

Modele strukturalny, miąższościowy, zailenia, porowatości i nasycenia przestrzeni porowej węglowodorami uzupełnione danymi złożowymi pozwalają policzyć na podstawie modelu statycznego zasoby – geologiczne i wydobywalne. W szczegółowych modelach złożowych, będących podstawą do stworzenia dynamicznego modelu, umożliwiającego symulację eksploatacji węglowodorów wykonywany jest model przepuszczalności efektywnej przestrzeni porowej i szczelinowej. Danymi wejściowymi są najczęściej oznaczenia laboratoryjne lub uzyskane w wyniku interpretacji litologiczno - złożowych krzywe geofizyczne, obliczone z odpowiednich formuł, np. Timura, Kormana-Kozeny'ego czy Zawiszy (Jarzyna, Bała, Zorski 2004)².

Procedura modelowania zmienności petrofizycznej, jest stosunkowo prostsza, od modelowania litofacjalnego, bowiem ciągły charakter zmienności danych wejściowych umożliwia zastosowanie klasycznych (ciągłych) algorytmów interpolacyjnych. Współczesne modelowanie zmienności petrofizycznej jest wykonywane w zależności od wcześniej policzonego modelu litologiczno – facjalnego. W programach najnowszej generacji, jak Petrel, estymacja każdego parametru zbiornikowego czy złożowego odbywa w intuicyjny sposób z uwzględnieniem proporcji litologi (lifofacji) wydzielonych w otworach i w modelu litologiczno-facjalnym. W programach starszej generacji, powiązanie wyników estymacji ze zmiennością facjalną nie jest tak proste. W przypadku SGM odbywa się on z wykorzystaniem procedury określenia regul obliczeniowych (*Determining Calculation Rules*), pozwalającej zdefiniować przy pomocy operacji logicznych IF-THEN-ELSE, które warstwy i/lub komórki mają pozostać w modelu. Komenda IF umożliwia zadeklarowanie warunków selekcji danych z modelu lub zbioru danych wejściowych (do 50 warunków dla każdej sekwencji obliczania modelu). Komenda THEN instruuje program co robić gdy warunki są spełnione (np. eliminuj komórki modelu). Komenda ELSE stanowi dla programu instrukcję, jak traktować komórki, w których warunki nie zostały spełnione.

Gdy dane wejściowe do modelowania przestrzennej zmienności parametrów zbiornikowych wykazują zmienność ciągłą, do obliczenia modelu atrybutowego stosowane są inne algorytmy, niż w

² W pracy nie zamieszczono modeli przepuszczalności i nasycenia, ze względu na pół-regionalny charakter modelu.

przypadku modelu facjalnego. Na tym etapie pracy stosunkowo często wykorzystywane są techniki deterministyczne. Do najprostszych należy algorytm najbliższego sąsiada (Closest, Closest Neighbour). Nieco bardziej złożone są algorytmy z grupy "odwrotnej" odległości (Moving Average [1], Weighted Average [8]). Jako technika wspomagające inne algorytmy, wykorzystywane są tzw. algorytmy funkcyjne - na ogół trendy wielomianowe (Davis 1986, Goodman 1999,[1]). Najbardziej złożone algorytmy deterministyczne wykorzystywane do opracowania modelu petrofizycznego to kriging uniwersalny (Deutsch, Journel 1998) stosowany (lub bez) trendem zewnętrznym (Extrenal Drift) (Dubrule 2003), wspomagany wykorzystaniem wariogriamów analizowanych parametrów, bądź co-krigingu (Colocated cokriging), transformacją procedurami danych oraz krzywymi prawdopodobieństwa zmian modelowanego parametru.

Oprócz metod deterministycznych do modelowania zmienności parametrów zbiornikowych wykorzystywane są również algorytmy stochastyczne oparte na podejściu iteratywnym, sekwencyjnym lub bezpośrednim (Dubrule 1998). Niezależnie od podejścia, algorytmy stochastyczne umożliwiają tzw. modelowanie warunk*owane (Condit*ional), które gwarantuje, że w takcie każdej symulacji statystycznej modele 3D i otworowy, w miejscu przecięcia zawsze będą zgodne. Do najczęściej stosowanych algorytmów stochastycznych współcześnie należy sekwency*jny Sequential Gaussian Simulation* - SGS (Gomez-Hernandez, Journel 1993, Dubrule 1998,[1]).

Do opracowania modelu parametrów zbiornikowych w programie StrataModel wykorzystywać można wykorzystać algorytmy *Closest Neighbour, Weighted Average* w opcji deterministycznej (*sharp*) lub wersji wygładzonej statystycznie (*smooth*). Model atrybutowy można również estymować z wykorzystaniem opisanego wyżej algorytmu *Stochastic*.

4.5 Podstawowy metodologiczne estymacji siatek interpolacyjnych 2D

Estymacja regularnych siatek interpolacyjnych 2D (RSI, *grid*) miały zasadnicze znaczenie dla stworzenia przedstawianego w tej pracy modelu 3D. W formie RSI opracowano: -mapy sejsmiczne w domenie czasowej; - modele prędkości średnich i interwałowych, mapy strukturalne oraz zgeneralizowane mapy strukturalne tworzące granice warstw modelu 3D. Także estymacja parametrów zbiornikowych w obrębie poszczególnych warstw *(layers),* w dużym stopniu stanowi sekwencje obliczania kolejnych RSI (Rys.4.12). Z tego powodu w rozdziale dotyczącym wykorzystanej metodyki przedstawiono podstawy estymacji gridów 2D, podkreślając wykorzystane techniki.

Procedura konstruowania mapy cyfrowej, opartej na regularnej siatce interpolacyjnej wymaga poprawnego określenia szeregu elementów decydujących o ostatecznej jakości rozwiązania. Podstawowe parametry decydujące o wyniku modelowania to:

- geometria obliczanej siatki interpolacyjnej;
- sposób wyszukiwania danych;
- adekwatnie dobrany do danych i oczekiwań sposób liczenia, tzw. algorytm estymujący.

4.5.1 Geometria siatki interpolacyjnej i jej wpływ na rozdzielczość mapy

Wygląd i zasadnicze etapy obliczania typowej prostokątnej RSI (*grida*) przedstawia w uproszczeniu rysunek 4.12. Dla danych wejściowych wykazujących (najczęściej) nieregularną dystrybucję przestrzenną (Rys.4.12a) wyznaczana jest RSI, składająca się z tzw. węzłów





(grid nodes) (Rys.4.12b). Siatce przypisywane są podstawowe parametry geometryczne – wyznaczane naroża (X_{min} , Y_{min} oraz X_{max} , Y_{max}) oraz są określane odległości pomiędzy węzłami siatki, tzw. spacjowanie siatki interpolacyjnej (grid increment, grid spacing). Spacjowanie jest stałe na całym obszarze modelu (Rys.4.12c), a utworzone węzły układają się w poziome rzędy (grid rows) i pionowe kolumny (grid columns). W każdym z węzłów RSI na podstawie danych wejściowych z otoczenia obliczana jest wartość Z (Rys.4.12c). Obliczona RSI (Rys.4.12d) może być użyta do wykreślenia ilościowej mapy konturowej, mapy konturowej z wypełnieniem barwnym bądź mapy przedstawiającej zmienność w formie grafiki rastrowej (*mosaic*) (Davis 1986, Swan, Sandilands 1996). Rozdzielczość map opartych na RSI jest ściśle uzależniona od ich skali, ilości i przestrzennej dystrybucji danych wejściowych oraz oczekiwanej zgodności z danymi wejściowymi. Wymienione czynniki decydują jak duże spacjowanie RSI, należy dobrać dla konkretnej siatki (*małe spacjowanie= mapa szczegółowa, duże spacjowanie = mapa trendu*).



Rys. 4.13. Możliwy wpływ gęstości siatki interpolacyjnej na jakość i rozdzielczość modelu liczonego na podstawie punktowych danych wejściowych (miąższość dolomitu głównego Ca2 w rejonie Bogdaj Uciechów). A) RSI o spacjowaniu 100m, zbliżonym do połowy odległości pomiędzy najbliżej leżącymi danymi wejściowymi; B) RSI o spacjowaniu 250m.

Teoretycznie, zadowalającą zgodność modelu z danymi wejściowymi może zapewnić spacjowanie nie większe niż ¹/₂ odległości pomiędzy najbliżej położonymi danymi wejściowymi. W praktyce jednak tak dobrane spacjowanie jest na ogół zbyt małe. W przypadku danych o nierównomiernej dystrybucji przestrzennej, takich jak, skupione rozkłady wierceń (Rys.4.13) czy wyniki interpretacji sejsmiki 2D (4.14), zastosowanie zbyt gęstej RSI może "dezintregrować" mapę, zaciemniając jej geologiczną treść, kosztem pozornej (statystycznej) dokładności (Rys.4.13a i 4.14a).

Standardowe (*default*) wartości spacjowania (*increment*) "podpowiadane" użytkownikom przez praktycznie, każdy z programów konturujących są na ogół niewłaściwe (Rys.4.13a, 4.14a), a



wykreślenie poprawnej geologiczne mapy wymaga zoptymalizowania gęstości siatki (Rys.4.13b, 4.14b). Poprawne merytorycznie rozwiązanie jest osiągane metodą kolejnych przybliżeń. Ostateczna mapa wynikowa stanowi kompromis zapewniający:

- statystyczną zgodnością RSI i danych, określaną przez pomiar wielkości odchyłek między wartościami modelowanymi (odczytanymi z RSI), a danymi wejściowymi (Papiernik et al. 2001, Papiernik 2002). Dobroć dopasowania modelu do danych można również wyrazić za pośrednictwem korelacji liniowej;
- możliwość wykartowania struktur żądanej wielkości, z zachowaniem ich amplitudy i kształtu. (Niektóre programy, jak np. IsoMap wchodzący w skład pakietu GES97, pozwalają zadeklarować promień najmniejszej struktury, która ma być wyodrębniona na mapie, program dopasowuje do tej wartości spacjowanie siatki);
- zachowanie regionalnego trendu geologicznego na obszarach słabiej kontrolowanych danymi;

Przedstawiony na rysunku 4.14 przykład przedstawia osiągnięty metodą kolejnych przybliżeń wynik optymalizacji gęstości RSI dla map sejsmicznych w domenie czasowej opracowanych przez autora na obszarze niecki miechowskiej.

4.5.2 Dobór danych do estymacji siatki interpolacyjnej

Różnorodność przestrzennych rozkładów danych wejściowych (szczegóły Davis 1986; Swan, Sandilands 1996), typów zmienności parametrów geologicznych oraz rodzajów danych wejściowych



Rys.4.15 Przykład wpływu techniki doboru danych do estymacji węzłów RSI, na wynik interpolacji. Do obliczenia wszystkich map zastosowano te same dane wejściowe, algorytm estymacji (InverseDistance) oraz gęstość siatki interpolacyjnej. Do wizualizacji zastosowano cięcie poziomicowe 2.5m. Różnicę metodyczną stanowi zastosowanie odmiennych technik doboru danych.

(np. dane otworowe, interpretacja sejsmiki 2D lub 3D) sprawiają, że jednym z kluczowych zagadnień metodologicznych, w znacznym zakresie współdecydującym o ostatecznym kształcie modelowanej powierzchni jest właściwe określenie ilości danych i technik wyszukiwania danych (Rys.4.15) używanych do liczenia wartości Z w kolejnych węzłach RSI.



Ze względów praktycznych - głównie dla przyśpieszenia procedury i uniknięcia nadmiernego

Rys.4.16 Podstawowe techniki wyszukiwania i doboru danych punktowych do estymacji siatek interpolacyjnych.

uśredniania wyników estymacji, w procesie obliczania Z w węzłach RSI na ogół nie stosuje się wszystkich danych wejściowych (*Global estmation*) lecz ograniczoną próbkę (*Local Estimation*), obejmującą od 10 do 20 punktów z otoczenia węzła (*neighbourhood*, Harbaugh et al. 1977, Davis

1986). Najczęściej stosowane metody wyszukiwania danych zestawiono na rysunku 4.16, szeregując je od najprostszej techniki doboru najbliżej położonych punktów - *Nearest Searching* (Rys.4.16a), poprzez różne metody wyszukiwania sektorowego - z lub bez ograniczenia odległości doboru danych (Rys.4.16b-d), i wyszukiwanie metodą naturalnego sąsiada (Rys.4.16e), po najbardziej zaawansowaną technikę wyszukiwania kierunkowego stosowaną do obliczenia semiwariogramów eksperymentalnych (Rys.4.16f).

Zastosowanie prostych technik wyszukiwania – zwłaszcza, wyszukiwania najbliżej położonych punktów (*Nearest,* Rys.4.16a), względem skupionych danych (takich jak interpretacja sejsmiki 2D) grozi ryzykiem powstania "sztucznych" nieciągłości na mapie (Harbaugh et al.1977). Ryzyko to jest mniejsze jeśli do wyszukiwania punktów zostanie użyta, któraś z technik sektorowych (4.16c, 4.16d bądź 4.16f). Przedstawiona na rysunku 4.16e technika wyszukiwania naturalnego sąsiada (*Natural Neighbour*) daje dobre rezultaty dla siatek konstruowanych na podstawie danych punktowych. Metoda ta jest w zasadzie elementem składowym algorytmu estymującego o takiej samej nazwie (Sibson 1981), dostępnego np. w programie Surfer.

W trakcie obliczania dwuwymiarowych RSI wykorzystywanych w pracy (Rozdziały 5 i 6), opisywanych w pracy na ogół stosowano lokalne wyszukiwanie sektorowe (w 8 sektorach) z ograniczonym zasięgiem wyszukiwania (Rys.4.16c) indywidualnie dobieranym do każdej mapy.

Dla obszarów charakteryzujących się zmiennością kierunkową (np. ukształtowanie strukturalne stref o budowie fałdowej, miąższość utworów fluwialnych, barier piaszczystych, itp.) proces doboru musi uwzględniać współczynnik anizotropii (WA) zaznaczający się na poziomie lokalnym lub globalnym. Używany do estymacji siatki WA można określić arbitralnie, np. na podstawie analizy strukturalnej map badanego rejonu lub w rezultacie geostatystycznej analizy zmienności danych wejściowych (Isaaks, Strivastava 1989, Mucha 1991). Współczynnik ten, na ogół nazywany *anisotropy;* bądź *bias, "*wskazuje" programowi kierunek, w którym dane są uwzględniane w obliczeniach z odpowiednio większą "wagą", bądź definiuje "temporalny" sposób konwersji geometrii siatki, tak by zbliżyć do siebie na czas estymacji dane znajdujące się w kierunkach uprzywilejowanych (Kushnir, Yarus 1992).

Anizotropię danych wejściowych na poziomie "globalnym" - w rozumieniu statystycznej analizy zmienności zbioru danych - można wykryć z wykorzystaniem analizy trendów wielomianowych, wspomaganej testami F (Snedeckora) (Davis 1986, Mucha 1991, Goodman 1999), pozwalającymi określić statystyczną istotność obliczonych powierzchni trendowych. W przypadku wykrycia istotnego trendu można go wykorzystać jako składnik sterujący interpolacją, bądź jako trend zewnętrzny w przypadku wykorzystania krigingu z tzw. zewnętrznym trendem regionalnym (*external drift kriging*, Dubrule 2003).

Anizotropię na poziomie lokalnym można określić geostatystycznie za pomocą poziomego wariogramu (semiwariogramu) eksperymentalnego, pozwalającego określić kierunki i siłę autokorelacji kartowanego parametru (Rys.4.16f). W przypadku bardzo rygorystycznego podejścia, obliczenie semiwarogramu powinna poprzedzać analiza trendów i ewentualnie usunięcie regionalnego składnika trendowego z analizowanego zbioru danych (Isaaks, Strivastava 1989, Dubrule 2003).

Występowanie autokorelacji i ciągłości kartowanych parametrów należą do podstawowych, założeń modeli opartych na regularnych siatkach interpolacyjnych (Harbaugh et al. 1977). Jednakże w wielu wypadkach modele wykonane zgodnie z tym założeniem są nieprawdziwe, gdyż nie uwzględniają obecności uskoków. Współczesne programy umożliwiają wprowadzenie nieciągłości do procedury wyszukiwania danych i estymacji RSI. Dyslokacje w modelowaniu RSI 2D stanowią linie zerwania ciągłości powierzchni (*Fault*), linia zmiany kierunku nachylenia (*Break Line*) lub wieloboki (*Fault Polygon*) wyznaczające ślad intersekcji powierzchni strukturalnej i płaszczyzny uskoku.



Rys.4.17 Stosowane w programie ZMAP-Plus techniki doboru danych wejściowych do estymacji RSI dla powierzchni nieciągłej. A) Sposób doboru punktów w module Point Gridding: uskoki traktowane jako "powierzchnie nieprzeźroczyste"; B) Sposób doboru punktów w technice Point Gridding Plus (algorytm Center Line Fault): uskoki traktowane jako "powierzchnie przeźroczyste".

Na rysunku 4.17 zilustrowano sposób w jaki rozwiązano problem uskoków w modułach *Point Gridding i Point Gridding Plus* programu ZMAP+. W pierwszym przypadku wprowadzane do estymacji uskoki są traktowane jako powierzchnie całkowicie nieprzeźroczyste, które uniemożliwiają dobór danych z przeciwnego skrzydła nieciagłości (Rys.4.17a).

W procedurze *Center Line Griddingu* dyslokacje są częściowo przeźroczyste (Rys.4.17b).W procesie estymacji i doboru punktów brana jest pod uwagę informacja o geometrii powierzchni uskokowej obejmująca kąt, kierunek i wielkość zrzutu uskoku (Zoraster 1992, Beyer 1993,1994). Obie wymienione procedury wykorzystywano do opracowania szczegółowych map strukturalnych oraz map (RSI) modeli prędkości średnich interwałowych (Papiernik 2001, Papiernik 2002, Papiernik et al. 2004, 2005, Jóźwiak, Papiernik 2003).

4.5.3 Algorytmy estymujące

Ostatnim kluczowym czynnikiem decydującym o jakości i zastosowaniu mapy kreślonej w oparciu o RSI jest wykorzystany algorytm estymujący. W obecnie stosowanym oprogramowaniu istnieje cała gama algorytmów przeznaczonych do rozmaitych rodzajów danych wejściowych, wykorzystujących całkowicie odmienne techniki wyszukiwania i adresowanych do odmiennych zadań. Wyniki estymacji różnymi algorytmami mogą być znacząco inne, a wybór techniki estymacji niedopasowanej do potrzeb użytkownika może spowodować poważne konsekwencje interpretacyjne (Rys.4.18).

Algorytmy wykorzystywane do obliczania regularnych siatek 2D i 3D można klasyfikować w rozmaity sposób. Waters i Van Lammeren (2002) proponują wyróżnienie pięciu zasadniczych grup procedur obliczeniowych. Na podstawie odmiennych kryteriów wyróżniają oni:

- Estymatory punktowe, liniowe i powierzchniowe ze względu na typ i rozkład danych wejściowych. Do grupy estymatorów punktowych zaliczają się algorytmy standardowo umieszczane w programach konturujących do obliczania siatek na podstawie danych punktowych, takich jak dane otworowe. Estymatory liniowe to specjalistyczne, niestandardowe algorytmy stosowane do wydajnego przetwarzania cyfrowanych konturów bądź wyników interpretacji sejmiki np. algorytmy CTOG czy Line Gridding; Estymatory powierzchniowe to np. używane do konstruowania map choroplet dane o gęstości zaludnienia dowiązane do kształtu jednostki administracyjnej;
- Estymatory lokalne (EL) i globalne (EG) (local and global estimators) pierwsze z nich liczą RSI na podstawie zmiennej na obszarze mapy próbki definiowanej techniką wyszukiwania danych (Rozdz. 4.5.2.), drugie używają do estymacji węzła RSI wszystkich danych wejściowych. Niektóre algorytmy jak np. algorytm minimalnej krzywizny (MC) mogą być wyłącznie EL, algorytmy takie jak trendy wielomianowe są zawsze EG, natomiast algorytmy z grupy odwrotnej odległości mogą należeć do obydwu grup w zależności od tego jak zdefiniowano sposób wyszukiwania danych;



Rys. 4.18 Przykłady zróżnicowania wyników estymacji spowodowanego zastosowaniem odmiennych algorytmów. Wszystkie mapy wykonano w programie Rockworks 99, z zastosowaniem tych samych danych wejściowych, przy identycznej gęstości siatki interpolacyjnej. Wykorzystane algorytmy : A) Triangulacja (Triangulation), B) Średniej ważonej (Inverse Distance), C) Średniej ważonej z podstawianiem obszarów brzegowych trendem wielomianowym (Inverse Distance + Polyenhancement), D) Trend wielomianowy drugiego rzędu (Trend Polynominal).

- Estymatory dokładne (ED) i przybliżone (EP) *(exact and aproximate estimators)* ze względu na zgodność modelu z danymi wejściowymi. ED powinny dawać bardzo wysoką zgodność RSI z danymi wejściowymi, zaś EP obliczają modele, w których wartość Z znacząco odbiega od danych wejściowych³. Do grupy ED zaliczymy np. kriging uniwersalny, algorytmy z grupy Radial Basis Function, nie filtrowany algorytm minimalnej krzywizny, *Closest Point* i wiele innych. Do sztandarowych przykładów EP należą modele obliczane jako trendy wielomianowe, czy powszechnie stosowaną metodę odwrotnej odległości;
- Estymatory deterministyczne (EDT) i stochastyczne (ES). EDT są to wszelkie algorytmy, które nie wykorzystują do obliczenia RSI rozkładów prawdopodobieństwa (nie są probabilistyczne) i na podstawie jednego zbioru danych zawsze dają ten sam wynik

³Ze względu na regularną strukturę RSI oraz sposób obliczania wartości Z, estymowane wartości niemal nigdy nie są idealnie zgodne z danymi wejściowymi

interpolacji. **ES** opierają się na koncepcji losowości zmian parametrów, a wynik zastosowania tych algorytmów nie będzie powtarzalny. Ta klasyfikacja jest najczęściej używana do opisu algorytmów 2D i 3D stosowanych w pakietach oprogramowania komercyjnego. Do **EDT** zaliczają się praktycznie wszystkie algorytmy stosowane w popularnych pakietach programów do modelowania powierzchni, m.in:

- proste techniki z grupy algorytmów najbliższych sąsiadów (*Closest Point, Natural Neighbours, itp*; szczegóły: patrz wyżej);
- estymacja wykorzystująca metody trójkątów (Gold et al., 1977, Davis 1986, Watson 1992, Mallet 2002);
- metody odwrotnej odległości (Inverse Distance, Moving Weighted Average, Weighted Average, szczegóły: patrz niżej);
- algorytmy najmniejszych kwadratów (Least Squures, Quadratic Shepard's Method, Weighted Least Squures, szczegóły: patrz niżej)
- algorytmy bazujące na dopasowaniu funkcji do danych (*Minimum Curvature, Thin Plate, Elastic Plate, B- spline,* czy nieco odmienne Radial Basis Functions) (m.in. Briggs 1974, Smith, Wessel 1990, Watson 1992, Gousie 1998, Carlson, Foley 1991, Hardy 1990, Zoraster 2003, Mallet 2008 i inni);
- różne odmiany krigingu kriging punkowy i blokowy (Punctual i Block Kriging), kriging prosty, zwykły i uniwersalny (Simple, Ordinary i Universal Kriging) czy też kriging z trendem zewnętrznym (External Drift Kriging) (Matheron 1963, 1970, Kriege 1966, Olea 1975, Journel, Huijbregts 1978, Lam 1983, Davis 1986, Isaaks, Strivastava 1989, Deutsch, Journel, 1998, Dubrule 2003).

Estymatory stochastyczne w programach do modelowaniach 2D są stosunkowo rzadkie. Zaliczają się do nich, np. dwuwymiarowe sekwencyjne symulacje Gaussa (*SGS*) [1] i wykorzystujący krzywe rozkładu prawdopodobieństwa i transformacje odległościowe algorytm Random Closest Point [8].

• Estymatory ciągłe i nieciągłe (gradual/abrupt). Estymatory ciągłe – takie jak np. metoda odwrotnej odległości przybliżają modelowaną powierzchnię 2D, jako powierzchnię ciągłą (np. wszystkie odmiany krigingu poza krigingiem wskaźnikowym - *Indicator kriging*) wszystkie odmiany metody odwrotnej odległości, itp.). Estymatory nieciągłe nie honorują zasady ciągłości modelowanej powierzchni Do tej grupy należy metoda najbliższego sąsiada i algorytmy stochastyczne, a także kriging wskaźnikowy.

Wymienione klasyfikacje nakładają się na siebie w dość złożony sposób. Utrudnia to klarowne omówienie technik estymacji. Przykładowo dla mapy konstruowanej na podstawie punktowych danych wejściowych, z wykorzystaniem metody najbliższego sąsiada można powiedzieć, że użyto estymatorów: – punktowego; -dokładnego; -globalnego; - deterministycznego; - nieciągłego.

W praktyce wykorzystanie algorytmów na ogół jest zależne od wykorzystywanych danych i bardzo często od oprogramowania. I tak, użytkownicy Surfera osiągają najlepsze wyniki stosując kriging uniwersalny, algorytm minimalnej krzywizny (*Minimum Curvature*) bądź algorytm z grupy *Radial Basis Functions.* Kriging lub algorytm minimalnej krzywizny (*Minimum Curvature*) są często stosowane przez użytkowników Isomapa, zaś algorytmy z grupy najmniejszych kwadratów (*Least Squares, Isopach, Bounded Range*) oraz odwrotnej odległośc*i (Weighted Average*) wspomagany techniką filtrowania biharmonicznego bądź Laplace'a (*Bihamonic, Laplacian Flexing*) dają najlepsze efekty w ZMAP+. Wyczerpujący przeglądy dostępnych algorytmów estymujących RSI podali m.in. Lam (1983), Davis (1986), Swan Sandilands (1996), Jones i in. (Jones., Hamilton, Johnson 1986). W przedstawianej pracy autor zamieścił skrócony opis podstawowych deterministycznych algorytmów estymujących, wykorzystanych do jej realizacji.

Algorytm odwrotnej odległości (Weighted Average)

Algorytmy z opisywanej grupy (w podstawowej formie) nie pozwalają dokonywać ekstrapolacji ekstremów siatki poza wartości danych wejściowych. Z tej przyczyny najlepsze rezultaty można uzyskać kartując parametry zmieniające się w ograniczonym zakresie na podstawie licznych danych wejściowych, szczególnie, gdy dane te charakteryzują się dużą, losową zmiennością lokalną jak np. mapy atrybutów sejsmicznych, czy mapy porowatości. W trakcie realizacji przedstawianej pracy, algorytmu WA używano stosunkowo rzadko, głównie do opracowania map prędkości interwałowych na obszarze południowej części niecki miechowskiej.

Algorytmy zaliczane do grupy metod odwrotnej odległości (*Inverse Distance, Weighted Average, Moving Weighted Average*) należą do najprostszych technik interpolacji numerycznej. Traktują one wszystkie dane z otoczenia estymowanego węzla RSI w identyczny sposób, rzutując ich wartości



Rys.4.19 Sposób estymacji wartości węzła siatki interpolacyjnej z zastosowaniem algorytmów z grupy Inverse Distance i Weighted Average

prostopadle (Rys.4.19). W tej sytuacji czynnikiem różnicującym wpływ poszczególnych punktów na wynik estymacji jest ich oddalenie od węzła RSI, dodatkowo modyfikowane wykładnikiem

potęgowym. Algorytmy z tej grupy doczekały się licznych mutacji (Watson 1992) jednakże wszystkie z nich bazują na podstawowym równaniu przedstawionym na rysunku 4.19. Wśród wymienionych parametrów kluczowe znaczenie ma odległość – d,. W trakcie uśredniania wielkość ta jest odwrotnie proporcjonalna do wagi punktu. Niezwykle duży wpływ na sposób obliczania modelu ma arbitralnie wyznaczany wykładnik potęgowy p. Jego zwiększenie powoduje spadek znaczenia punktów oddalonych od "obliczanego" węzła RSI.

Metoda najmniejszych kwadratów [LS]

Algorytmy z tej grupy, np. Weighted Least Squares czy Least Squares (ZMAP+) wykorzystują metodę najmniejszych kwadratów do określenia równania powierzchni najlepszego dopasowania. Czasami powierzchnia ta jest liczona z użyciem wielomianów drugiego lub wyższego rzędu (np., *Quadratic Shepard's Method,*). Algorytmy te zawsze zaliczaj się do estymatorów lokalnych i używają do obliczania wartości węzla RSI próbki punktów z otoczenia - najczęściej wyselekcjonowanych w wyniku wyszukiwania w sektorach. W pierwszym etapie estymacji dla wybranych punktów metodą najmniejszych kwadratów wyznaczana jest plaszczyzna najlepszego dopasowania (Rys.2.20a). Równolegle do obliczonej powierzchni "na lokalizację węzla RSI" rzutowane są punkty z otoczenia. Wartość Z_w obliczana jest na podstawie wartości uzyskanych w wyniku rzutowania ważonych odwrotnością odległości podniesionej do potęgi *p* (W: Rys. 4.20b).



Rys.4.20 Metoda najmniejszych kwadratów (Least Squares). A) Schemat estymacji w podstawowej wersji algorytmu. B) Uogólniony sposób estymacji RSI algorytmem z grupy LS

Algorytmy z grupy najmniejszych kwadratów w czystej formie są estymatorem przybliżonymi, gdyż oddając w prawdopodobny sposób zasadnicze cechy budowy geologicznej, nie wykazują nigdzie idealnej zgodności z danymi wejściowymi. Zaawansowane programy jak np. ZMAP+ eliminują ten brak precyzji przez zastosowanie postprocessingu dowiązującego RSI do danych wejściowych, tzw. *flexingu.[8]*. Także w Petrelu [1] dostępne są procedury postprocesingu, który umożliwiają dokładne dowiązanie danych wejściowych do siatki interpolacyjnej.

Metoda najmniejszych kwadratów daje bardzo dobre wyniki, gdy jest stosowana do

przetwarzania stosunkowo równomiernie rozmieszczonych danych punktowych, zwłaszcza miąższościowych i strukturalnych. Doskonałe wyniki daje także zastosowanie metody najmniejszych kwadratów do konstruowania map strukturalnych uwzględniających uskoki, na podstawie danych sejsmicznych -zarówno 2D, jak i 3D (Beyer 1993, 1994). W przedstawianych modelowaniach algorytm LS stosowano do opracowania wszystkich map sejsmicznych w domenie czasowej, zaprezentowanych w rozdziale 5.

Modyfikacją algorytmu LS do stosowaną do konstruowania map miąższości jest w programie ZMAP+ algorytm *Isopach*, pozwalający użytkownikowi kontrolować sposób kreślenia izopachyty 0m [8]. Algorytm ten wykorzystano do opracowania map miąższości w niecce miechowskiej (Rozdz.2).

Algorytmy niekonwencjonalne

Przetwarzanie cyfrowanych izolinii i interpretacji sejsmiki 2D

Dane ułożone wzdłuż konturów lub przekrojów charakteryzują się bardzo specyficzną, skrajnie niejednorodną dystrybucją przestrzenną, sprawiającą, że RSI 2D konstruowane z wykorzystaniem klasycznych algorytmów charakteryzują się zaburzeniem geometrii wzdłuż cyfrowanych izolinii przypominające zagłębienia i tarasy w obrębie stoku (Wingle 1992, Gousie, Franklin 1998, 2003,Gousie 1998). Kolejną cechą danych uzyskiwanych w wyniku cyfrowania map archiwalnych jest ich ogromna liczebność. By uzyskać dobrej jakości siatki opracowano szereg algorytmów umożliwiających precyzyjne i szybkie przetwarzanie danych.

Najprostsze algorytmy z tej grupy opierają się na obliczeniu średniej pomiędzy profilami wyprowadzanymi pod kątem 90 lub 45° z węzła siatki interpolacyjnej. Dla każdego profilu, brana do uśrednień wartość jest obliczana w wyniku liniowej interpolacji między dwoma konturami przecinającymi profil (Yoeli 1986). Wartość RSI jest obliczona *metodą odwrotnej odległości* przez ważone odległością uśrednianie wartości konturów.

Inna grupa algorytmów używanych do przetwarzania konturów uwzględnia w estymacji kąt nachylenia powierzchni. Do najstarszych algorytmów z tej grupy należy algorytmy sekwencyjne badające stromość stoku (Gousie 1998).

Do stosunkowo dokładnych metod przetwarzania cyfrowanych konturów w RSI z zastosowaniem algorytmów opierających się na wykorzystaniu krzywych składanych – tzw. *splinów* (Dierckx 1988), stosowanych również w połączeniu z liniami gradientów, wyznaczonymi wzdłuż kierunków maksymalnego spadku, jako algorytm linii gradientów (*Gradient Line*) (Gousie 1998, Gousie, Franklin 1998). Według Gousiego (1998) powierzchnia obliczona w ten sposób cechuje się dużą zgodnością z danymi, jednak może wykazywać niezbyt dużą gładkość, gdyż poszczególne linie gradientów nie wykazują żadnego związku między sobą. Wadą tej techniki może być stosunkowo niska dokładność aproksymacji powierzchni metodą cienkiej płytki, a tym samym potencjalnie niska dokładność przebiegu linii gradientów.

Do wydajnych, choć rzadziej stosowanych technik przetwarzania należy metoda konturów pośrednich (*Intermediate Contours*). W aspekcie obliczeniowym opiera się on na aproksymującym minimalnej krzywizny (cienkiej płytki, *Thin Plate*). Nowatorstwo tego algorytmu polega przede wszystkim na zastosowanej technice wstępnego "zagęszczania" danych wejściowych przez dołożenie tzw. konturów pośrednich, zwiększających dokładność modelu.

Przykładem takich technik estymacji dostępnych w programach komercyjnych jest dostępny w programie ZMAP+ algorytm **Contour Gridding - CTOG**, przeznaczony do wydajnego przetwarzania map konturowych w RSI [7]. CTOG przez wiele lat był wykorzystywany przez USGS do opracowania cyfrowych wersji map topograficznych (Gousie 1998, Gousie, Franklin 1998). CTOG jest procedurą dwustopniową, która pierwotną siatkę liczy z wykorzystaniem 2 lub 4 osi wyszukiwania, a końcowe przetwarzanie wykonuje z użyciem równań biharmonicznych ([7], Papiernik 1998, 2001, Górecki et al. 1998). W programie ZMAP+, algorytm CTOG jest również wykorzystywany do lokalnej "reestymacji" RSI, w przypadku edycji konturów z użyciem interaktywnego edytora danych [7]. W przypadku estymacji RSI z uskokami jest to procedura niemal rutynowa. W takcie realizacji tematu CTOG był w tym celu wielokrotnie używany do opracowania czasowych map sejsmicznych i map prędkości. Podobne, specjalistyczne algorytmy są również dostępne w programach **ArcGIS - ArcInfo** (np. wersje 9.0, 9.1) [9] czy też ANUDEM 5.2 (Hutchison 2006). W programie Petrel najwydajniejsze i dokładne przetwarzanie liniowych danych wejściowych tego typu zapewnia algorytm Converter Gridder [1]

Na identycznych zasadach jak CTOG działają algorytmy Line Gridding i Line Gridding Plus, przeznaczone do szybkiej estymacji modeli na podstawie danych sejsmicznych (Jóźwiak, Papiernik 2003).

Techniki interpolacji sterowanej zewnętrznie

W trakcie realizacji map osnowy stratygraficznej modelu zwłaszcza map prędkości średnich i interwałowych wykorzystano nieco zbliżony do co-krigingu (Isaaks, Strivastava 1989, Doyen 1988, Doyen et al. 1996), i trendowego wspomagana procedury interpolacji [1], algorytm - Trendform Gridding. [TFG], który wykorzystuje do estymacji procedury transformacji odległości oraz umożliwia kierowanie procesem interpolacji z zastosowaniem tzw. modelu sterującego (*form grid*) (Zoraster 1996, [7]). Dodatkowe zalety zastosowania tej techniki stanowią:

- możliwość sterowania silą interpolacji w zależności od lokalnej zmienności danych przez zwiększanie lub zmniejszanie powierzchni anomalii tworzących się wokół pojedynczych silnie "odstających" danych (parametr BIAS);
- możliwość wykorzystania w procesie interpolacji uskoków;
- zachowanie lokalnej szczegółowości w strefach gęsto kontrolowanych danymi;
- możliwość obliczenia statystycznie prawdopodobnych trendów w strefach słabo

kontrolowanych danymi.

TFG nie należy do często stosowanych technik interpolacji, jednak jej wykorzystanie przez Służbę Geologiczną Danii (GEUS) do modelowania map prędkości średnich oraz do konstruowania map strukturalnych horyzontów zaburzonych tektoniką solną dało bardzo interesujące efekty (Bitze1998). Także dotychczasowe próby wykorzystania TFG w projektach realizowanych w ZSE AGH (m. in. do konstruowania map prędkości średnich czy zmienności litofacjalnej dało zadowalające wyniki (Papiernik et al. 2001, Górecki et al. 2001, Papiernik 2002).