

Krzysztof Sowizdzał  
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

## Analiza niepewności wyników obliczeń zasobów złóż węglowodorów metodą objętościową, w oparciu o statyczny, przestrzenny model złoża

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie metodyki analizy niepewności w odniesieniu do wyników modelowania złożowego oraz obliczeń zasobów geologicznych złóż węglowodorów metodą objętościową. Pierwsza część artykułu obejmuje podstawowe zagadnienia konstrukcji modeli przestrzennych rozkładów parametrów petrofizycznych. Przedstawiono etapy budowy modeli 3D; od integracji danych, poprzez ich analizę geostatystyczną, do modelowania przestrzennych rozkładów parametrów petrofizycznych z wykorzystaniem atrybutów sejsmicznych oraz obliczeń zasobów złóż metodą objętościową w oparciu o modele przestrzenne. Część niniejszego artykułu była prezentowana na Konferencji GEOPETROL 2008; obecna wersja została wzbogacona o przykłady będące wynikiem analizy większej liczby obiektów złożowych, w węglanowych i klastycznych skałach zbiornikowych. Ponadto rozszerzona została część poświęcona analizie niepewności wyników obliczeń zasobów geologicznych złóż węglowodorów.

### Uncertainty analysis in 3D reservoir modeling

The article presents methodology of uncertainty analysis with respect to the results of 3D reservoir modeling and volume calculations. First part of the paper covers principles of 3D reservoir models construction; consecutive stages of workflow are described, including data integration, geostatistical analysis, generation of 3D models exploiting secondary seismic data and volume calculations. Part of the article was presented at the GEOPETROL 2008 Conference; current version has been enhanced by the results of other reservoir objects analyses in carbonate and clastic reservoir rocks. Additionally, section dealing with uncertainty analysis in reservoir modeling has been added.

### Wprowadzenie

Dostępność trójwymiarowych, statycznych modeli, obrazujących rozkład parametrów petrofizycznych i złożowych, ma zasadnicze znaczenie na etapie rozwiercania struktur złożowych, jak również planowania prac zmierzających do zwiększenia stopnia szczypania złóż eksploatowanych. Pozwalają one m.in. na [2]:

- integrację danych pochodzących z różnych typów pomiarów (sejsmika, geofizyka otworowa, pomiary na materiale rdzeniowym), z uwzględnieniem skali, w jakiej pomiary te zostały wykonywane,
- dokładniejszą niż w przypadku operacji na gridach 2D ocenę wielkości zasobów geologicznych i wykonanie wstępnej analizy ekonomicznej wartości złoża,
- optymalną, uzasadnioną ekonomicznie lokalizację odwiertów i wybór ich typu (pionowe, horyzontalne),
- stworzenie modelu symulacyjnego, pozwalającego prognozować wpływ poszczególnych scenariuszy eksploatacji na ekonomiczną efektywność złoża.

Podstawowe znaczenie dla uzyskania możliwie jak największej precyzji przestrzennych modeli petrofizyczno-facjalnych ma wykorzystanie danych sterujących rozkładem

parametru analizowanego, z którym wykazują korelację, a ponadto odznaczają się pełniejszym pokryciem obszaru badań. Do danych tego typu można zaliczyć rozkłady atrybutów sejsmicznych [2, 5, 6, 8], czy też wcześniej sporządzone modele innych parametrów (np. model porowatości w procesie budowy modelu rozkładu przepuszczalności) [2]. W Polsce zagadnienie opisu rozkładów parametrów złożowych z wykorzystaniem atrybutów sejsmicznych było przedmiotem badań zespołu pracowników Instytutu Nafty i Gazu oraz Ośrodka Północ w Pile (PGNiG) w ramach projektu badawczego pt.: „*Sejsmicznie konsystentne estymatory złoża węglowodorów*” [6].

Proces budowy przestrzennych, statycznych modeli facjalnych i petrofizycznych przebiega kilkietapowo; w uproszczeniu można go przedstawić następująco:

- budowa modelu strukturalnego, wykorzystującego wyniki interpretacji strukturalnej danych sejsmicznych i stratygraficznej interpretacji profilowań geofizyki otworowej,
- konstrukcja modelu architektury litofacjalnej poziomu zbiornikowego, integrującego informacje otworowe

odnośnie wykształcenia litologiczno-facjalnego oraz dane sejsmiczne i bazującego na koncepcji sedymentologicznej analizowanego poziomu zbiornikowego w danym obszarze,

- konstrukcja przestrzennych rozkładów parametrów petrofizycznych – wykorzystujących wyniki interpretacji danych otworowych zintegrowanych z danymi sejsmicznymi.

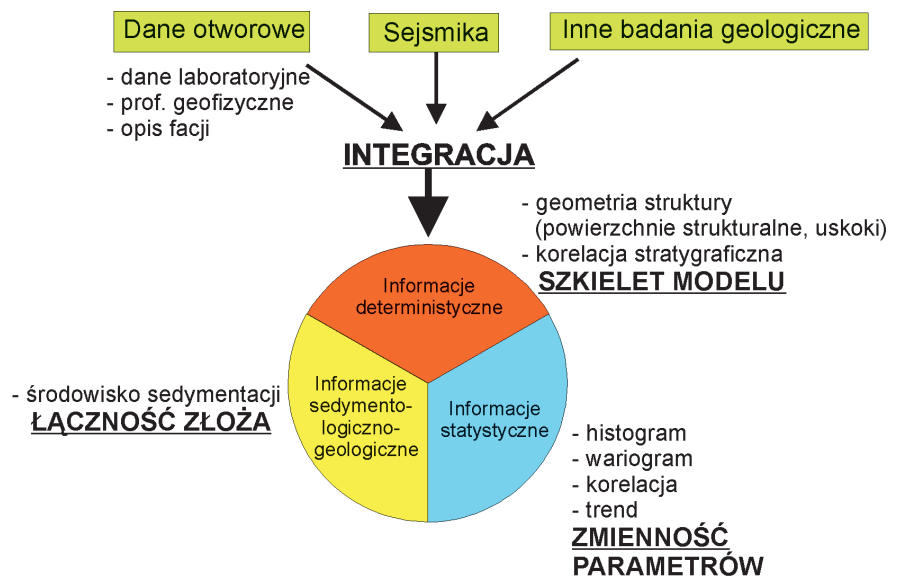
Na każdy z powyższych etapów składa się szereg kolejnych kroków, prowadzących do celu, jakim jest stworzenie cyfrowego, szczegółowego geologicznego modelu 3D, który jednocześnie uwzględni szeroki wachlarz danych geologicznych, geofizycznych i złożowych (rysunek 1), charakteryzujących się różnym stopniem rozdzielczości, jakości i wiarygodności.

Ze względu na zróżnicowanie zmienności parametrów petrofizycznych w obrębie poszczególnych wydziałów litologicznych/facjalnych, sporządzenie w pierwszej kolejności przestrzennego modelu facjalnego, a następnie modelowanie rozkładów parametrów petrofizycznych indywidualnie dla każdej facji, zawęża przedział błędów estymacji/symulacji z uwagi na fakt, że zakres zmienności danego parametru dla jednego wydziału facjalnego jest znacznie mniejszy niż w przypadku całej popu-

lacji danych. Ponadto podejście takie stwarza możliwość szerszego wykorzystania informacji pochodzących z danych sejsmicznych (poprzez wykorzystanie odmiennych atrybutów sejsmicznych np. podczas wyznaczania rozkładów, porowatości w obrębie poszczególnych wydziałów litofacjalnych) [2, 3].

W niniejszym artykule analizowano 3 obiekty złożowe, zlokalizowane w różnych skałach zbiornikowych:

- X – złożo w poziomie zbiornikowym dolomitu głównego,
- Y – złożo w podmiocieńskich, węglanowych utworach dewonu górnego,
- Z – złożo w utworach klastycznych.



Rys. 1. Schemat integracji danych oraz charakteru informacji jakie wnoszą, według [8] (zmodyfikowany przez autora)

## Integracja danych

W przedstawionych przykładach integracja danych przebiegała dwustopniowo:

- w pierwszej kolejności integracji poddano dane otworowe (wyniki pomiarów laboratoryjnych oraz profilowania geofizyczne), czego efektem są spójne profile parametrów petrofizycznych analizowanych poziomów zbiornikowych w poszczególnych otworach wiertniczych,
- kolejny etap integracji danych obejmuje kalibrację parametrów petrofizycznych oraz litologicznych z danymi sejsmicznymi, a także wyznaczenie współczynnika korelacji pomiędzy parametrami modelowanymi i sterującymi rozkładem, dla których dysponujemy pełniejszym pokryciem na analizowanym obszarze.

Uzyskane wartości współczynników korelacji wykorzystywane są przez algorytm obliczeniowy i określają wagę informacji z danych sejsmicznych. W przypadku

modelowania facjalnego informacja zawarta w danych sejsmicznych integrowana jest z danymi otworowymi (opisem facji/wynikiem interpretacji litologicznej profilowań geofizycznych) poprzez wyznaczenie krzywej prawdopodobieństwa występowania danego wydziału facjalnego, w zakresie wartości danego atrybutu sejsmicznego.

Znaczną poprawę odwzorowania rozkładów przestrzennych (zwłaszcza w aspekcie zmienności w kierunku pionowym) uzyskuje się w przypadku dostępności wolumenów atrybutów sejsmicznych w domenie głębokości. W analizowanych przykładach wykorzystywano atrybuty objętościowe w postaci kostki, jak również gridy 2D średnich wartości atrybutów w danym interwale. Wadą tych ostatnich, w przypadku konstrukcji modeli przestrzennych, jest uzyskiwanie wyniku w pewnym stopniu uśrednionego w kierunku pionowym.

## Geostatystyczna analiza danych

Elementy analizy geostatystycznej wykonywane są na kilku etapach konstrukcji modeli przestrzennych i obejmują m.in.:

- modelowanie histogramów i ocenę jakości uśredniania w profilach otworów wiertniczych, poprzez porównanie histogramów danych wejściowych z danymi po dokonaniu skalowania (z ang. *up-scaling*) – wybór optymalnej metody i opcji skalowania,
- transformacje danych po skalowaniu, zmierzające do

uzyskania stacjonarności populacji danych. W przedstawionych przykładach wykorzystywano m.in.: definiowanie zakresu wartości modelowanego parametru, separację trendów, transformacje logarytmiczne (dla przepuszczalności) oraz transformacje do rozkładów normalnych,

- ilościowe zdefiniowanie korelacji przestrzennej – oszacowanie parametrów wariogramów,
- generowanie i ocenę jakości uzyskanych rozkładów przestrzennych.

## Modelowanie parametrów petrofizycznych i obliczanie zasobów złoża

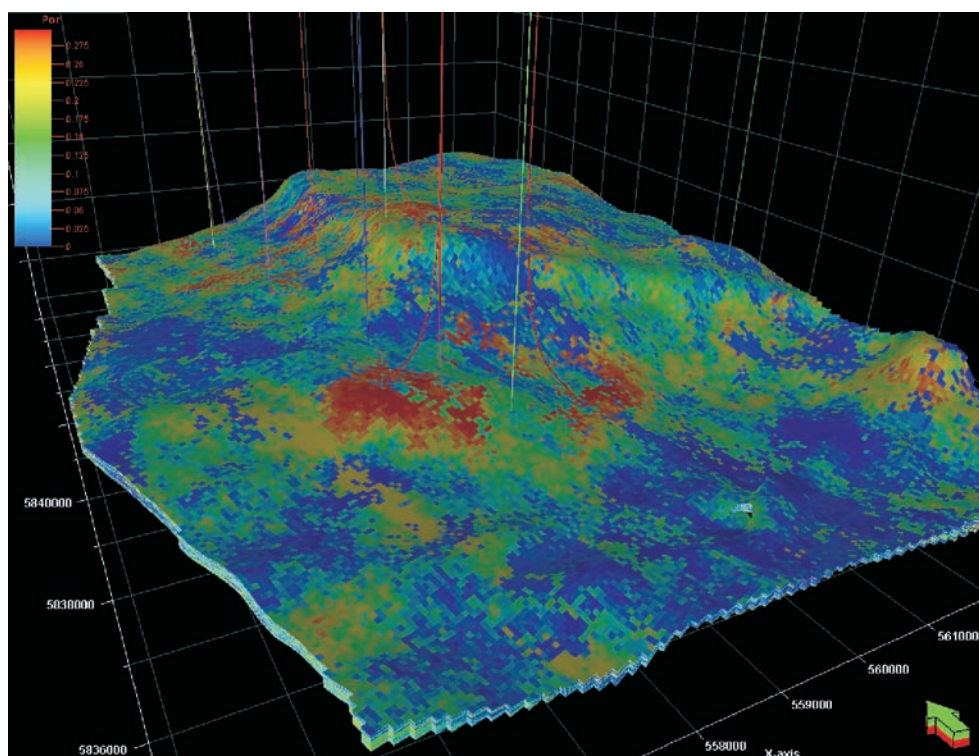
W procesie generowania rozkładów przestrzennych analizowanych parametrów wykorzystywane są:

- dane otworowe, poddane geostatystycznej analizie,
- atrybuty sejsmiczne (w postaci wolumenów lub gridów 2D),
- zależność pomiędzy tymi grupami danych, określona na etapie integracji.

W opisywanych przykładach modele przestrzenne parametrów petrofizyczno-złożowych skonstruowano za pomocą algorytmu sekwencyjnej symulacji Gaussa, z wykorzystaniem danych sejsmicznych w opcji *co-kriging*.

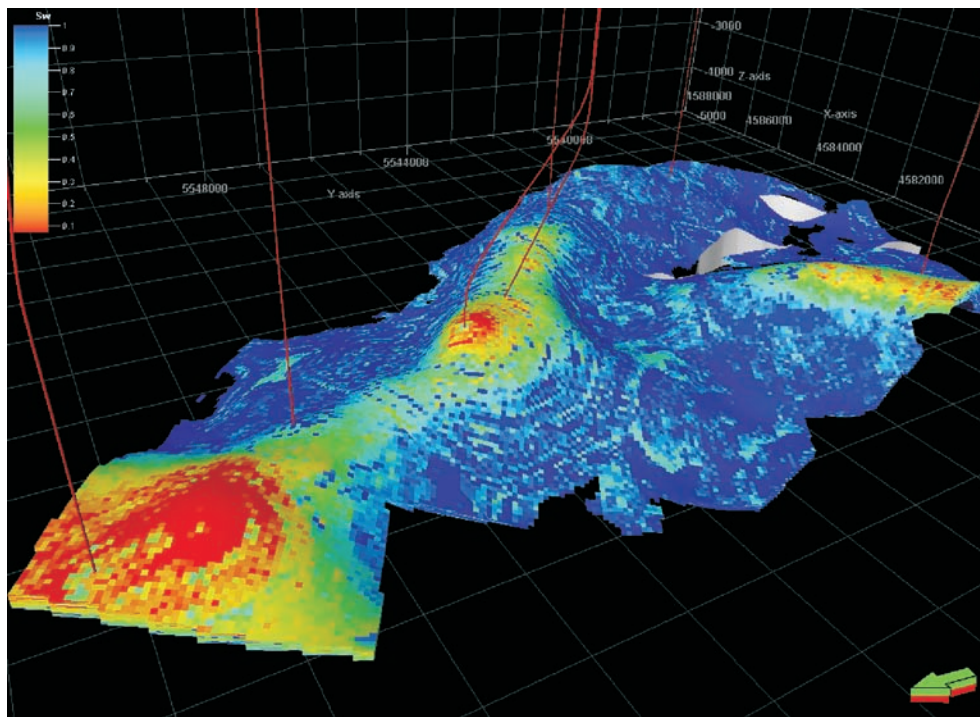
W celu obliczenia zasobów złoża węglowodorów w oparciu o gridy 3D, konieczne jest skonstruowanie rozkładów przestrzennych trzech podstawowych wielkości: porowatości, nasycenia (węglowodorami lub wodą złożową) oraz stosunku objętości efektywnej do objętości całkowitej poziomu zbiornikowego (z ang. *Net to Gross* – N/G). Niezbędna jest również znajomość właściwości fizycznych płynów złożowych.

Operacje matematyczne na tych gridach prowadzą do otrzymania wyników obliczeń zasobów złóż węglowodorów metodą objętościową i stanowią model bazowy dla analizy niepewności.



Rys. 2. Wizualizacja przestrzennego modelu porowatości złoża X





Rys. 3. Wizualizacja przestrzennego modelu nasycenia wodą złożową złoża Y

### Analiza niepewności

Fakt, iż modelując rozkład parametrów petrofizyczno-złożowych dysponujemy ograniczoną ilością danych – w szczególności danych o wysokiej wiarygodności (pomiar laboratoryjny na materiale rdzeniowym, profilowania geofizyczne w otworach wiertniczych), które reprezentują ułamek objętości całego analizowanego obiektu – pozostawia szerokie pole dla interpretacji wyników, ich interpolacji i ekstrapolacji w strefach pomiędzy i poza otworami wiertniczymi. W interpretacji tej wykorzystywane są dane o niższym stopniu wiarygodności, odnoszące się do obszarów, dla których brak jest danych bardziej pewnych – np. atrybuty sejsmiczne, a więc tym bardziej wynik danej „realizacji” rozkładu przestrzennego analizowanego parametru obarczony jest niepewnością [1, 4].

W celu ograniczenia, a przynajmniej zdefiniowania skali niepewności/ryzyka, jakim obarczone są wyniki modelowania rozkładu przestrzennego analizowanych parametrów oraz obliczeń zasobów złóż wykonanych na ich podstawie, stosuje się analizę niepewności (*uncertainty analysis/risk assessment*) [2, 3, 7].

Niepewność nie jest cechą złóż; wynika ona z ograniczonej wiedzy o obiekcie złożowym. Nie istnieje jednak obiektywna miara niepewności; jest ona więc subiektywną oceną stanu niewiedzy interpretatora/ów odnośnie analizowanego obiektu złożowego [4].

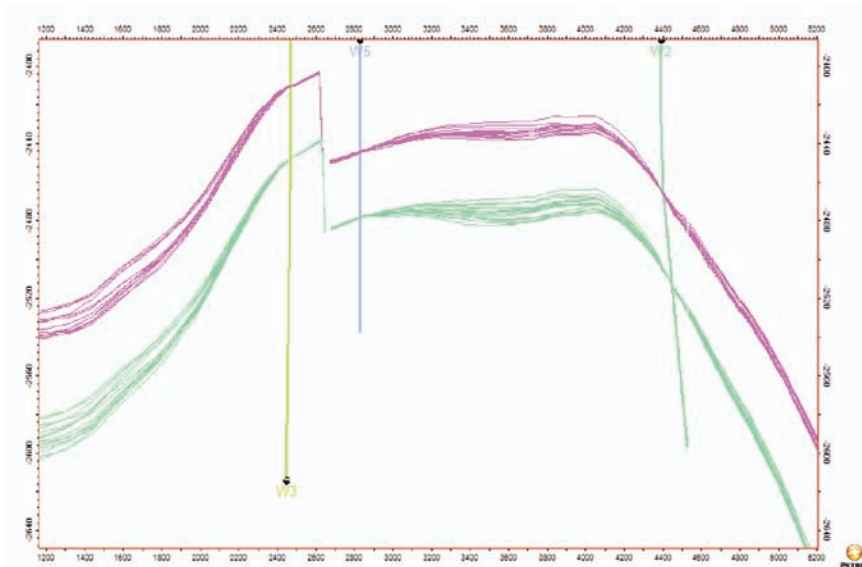
W niniejszym artykule niepewność oceniano różnie (subiektywnie lub w oparciu o podane kryterium) w od-

niesieniu do poszczególnych, przytoczonych poniżej elementów obarczonych niepewnością, poddanych ewaluacji.

Analiza niepewności nie jest tożsama z walidacją skonstruowanych modeli petrofizyczno-złożowych, pozwala natomiast ocenić w jakim stopniu ograniczona wiedza o analizowanym obiekcie złożowym wpływa na wynik obliczeń objętościowych, określić wagę wpływu poszczególnych czynników niepewności oraz, pośrednio, prowadzi do optymalizacji modeli parametrów petrofizyczno-złożowych.

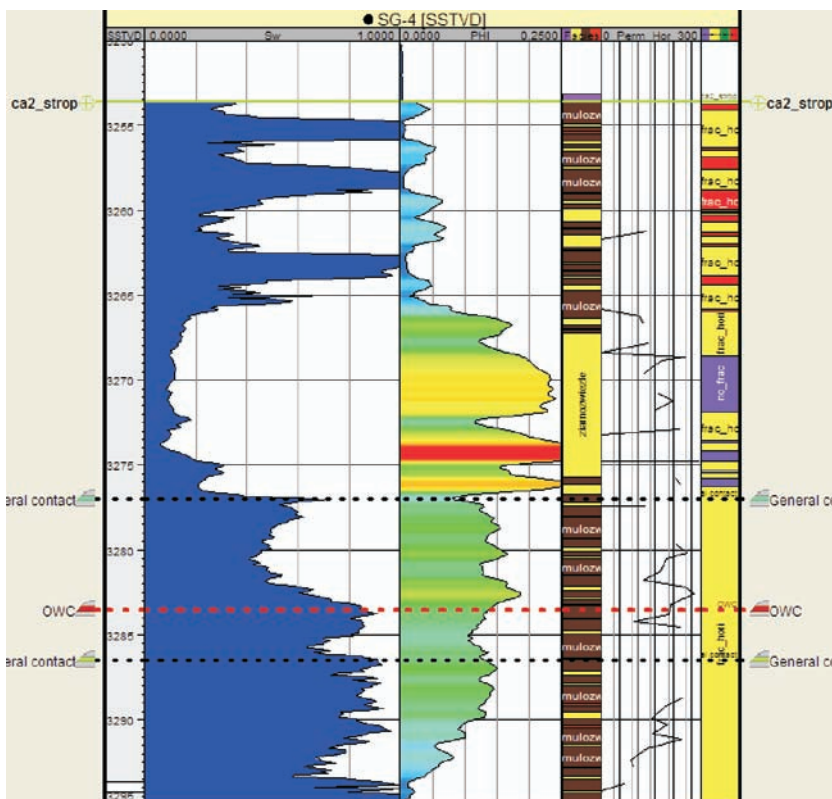
W analizowanych przykładach, jako czynniki obarczone niepewnością zdefiniowano wyniki następujących składowych, wpływających na wielkość zasobów geologicznych złoża węglowodorów:

- niepewność strukturalna – głębokość zalegania powierzchni stropu i spągu poziomu złożowego, przy czym w lokalizacjach otworów wiertniczych głębokości te uznawane były za pewne, natomiast wraz ze wzrostem odległości od odwiertów wzrastały możliwe odchyłki od wartości wynikającej z mapy danej powierzchni. W analizowanych przykładach autor przyjął, że maksymalne odchyłki mogą wynieść od 3-5 m dla poszczególnych złóż (rysunek 4 – niepewność strukturalna objawia się rozrzutem pomiędzy minimalnymi i maksymalnymi głębokościami zalegania powierzchni, uzyskanymi w poszczególnych realizacjach procesu obliczeniowego).



Rys. 4. Graficzna prezentacja wyników analizy niepewności strukturalnej złoża Z

- o niepewność głębokości położenia konturu wodnego – w miejsce głębokości konturu, wyrażonego liczbą, wstawiono zmienną losową z przedziału +/- kilka metrów od głębokości wynikającej z interpretacji profilowań geofizyki otworowej (rysunek 5).



Rys. 5. Przykład definiowania przedziału niepewności położenia konturu wodnego złoża X (pierwsza ścieżka)

- o parametry procesu obliczenia przestrzennego rozkładu porowatości, m.in. wartości współczynnika kore-

lacji pomiędzy danymi otworowymi a danymi sejsmicznymi. Korelacja pomiędzy tymi grupami danych była określana poprzez wykres krzyżowy logów porowatości (uśrednionych w interwałach odpowiadających pionowej rozdzielczości modeli) z logami wyekstrahowanymi z wolumenów danych sejsmicznych (po uprzednim przepróbkowaniu (*resamplingu*) powyższych w zdefiniowanej rozdzielczości grida 3D). Badając niepewność w odniesieniu do wyniku obliczeń przestrzennego modelu porowatości, wartość współczynnika korelacji została zastąpiona przez zmienną losową z przedziału, którego granice wyznaczały minimalne

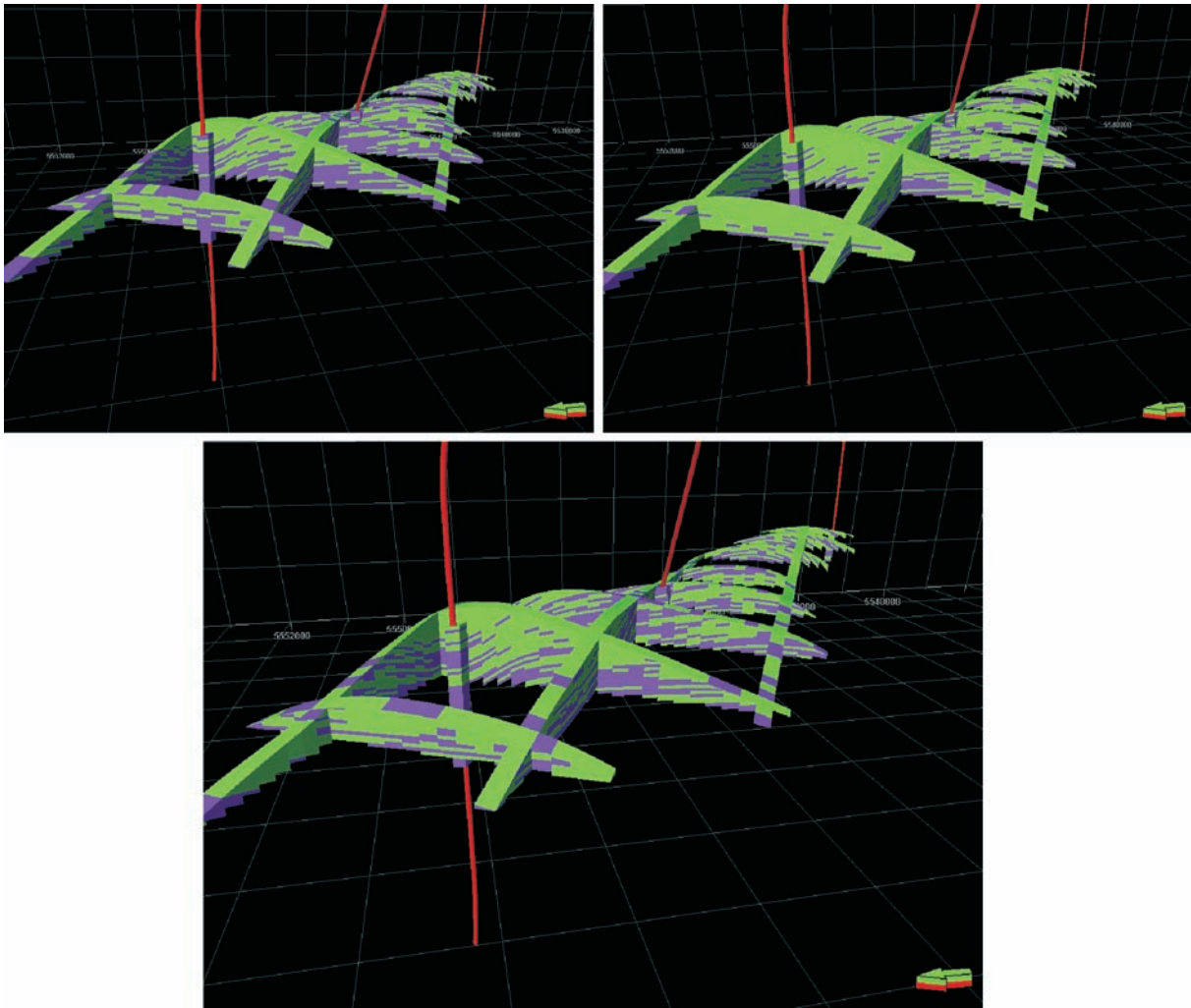
i maksymalne wartości korelacji pomiędzy tymi grupami danych, ale wykonywanymi indywidualnie dla każdego odwiertu. Innymi słowy, zdefiniowany przedział niepewności wynikał ze zmienności współczynnika korelacji pomiędzy danymi otworowymi i sejsmicznymi

na obszarze badań. Niedokładność tę można także ograniczyć konstruując rozkład współczynnika korelacji w postaci grida 2D lub 3D.

- o wartość parametru *Net to Gross* – w jednym z analizowanych przykładów badano niepewność wyników obliczeń zasobów złoża gazu ziemnego w aspekcie założeń, jakie musi spełnić skała zbiornikowa, aby można było ją uznać za efektywną (rysunek 6 – kolor zielony oznacza efektywną objętość poziomu zbiornikowego, kolor fioletowy – objętość nieefektywną).

Zdefiniowane czynniki niepewności analizowane były poprzez symulacje Monte Carlo oraz studium wrażliwości (z ang. *sensitivity study*), w którym w poszczególnych realizacjach procesu obliczeniowego reprezentujące model bazowy parametry zastępowane były zmiennymi ze zdefiniowanych przedziałów (określenie „model bazowy”, zdaniem autora, odnosi się do najbardziej wiarygodnego zestawu modeli porowatości, nasycenia

woda złożowa, N/G). W przypadku symulacji Monte Carlo wszystkie czynniki niepewności analizowane są w jednej

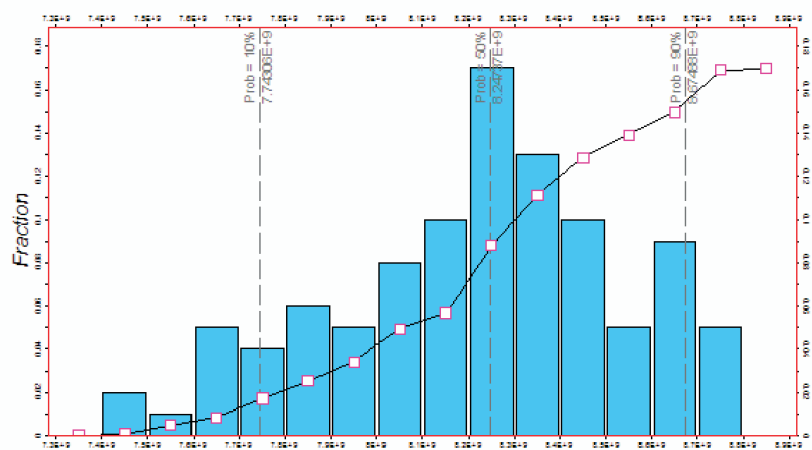


**Rys. 6.** Wizualizacja modelu Net/Gross złoża Y;  
a) pesymistyczny, b) optymistyczny, c) odpowiadający środkowi przedziału niepewności

dłuższej pętli obliczeniowej, natomiast studium wrażliwości dostarczało odpowiedzi odnośnie wpływu poszczególnych czynników niepewności na rozrzut wyników obliczeń zasobów analizowanych złóż [9].

Na rysunku 7 zamieszczono wykres prezentujący wynik uzyskany dla łącznej niepewności liczonej metodą Monte Carlo, będący efektem analizy 100 realizacji procesu obliczenia zasobów. Wyniki przedstawione są w postaci histogramu i skumulowanej funkcji dystrybucji. Analizie poddana jest tutaj wielkość zasobów geologicznych gazu ziemnego rozpuszczonego w ropie. Na osi X przedstawiono wielkość zasobów, natomiast na osi Y – częstość występowania danej wartości w poszczególnych przedziałach skali zasobów. Wprowadzono także wartości odpowiadające prawdopodobieństwu

P10, P50 i P90, przy czym wartości te należy rozumieć następująco: P10 – wielkość zasobów, w stosunku do której 10% uzyskanych wyników (z całkowitej liczby

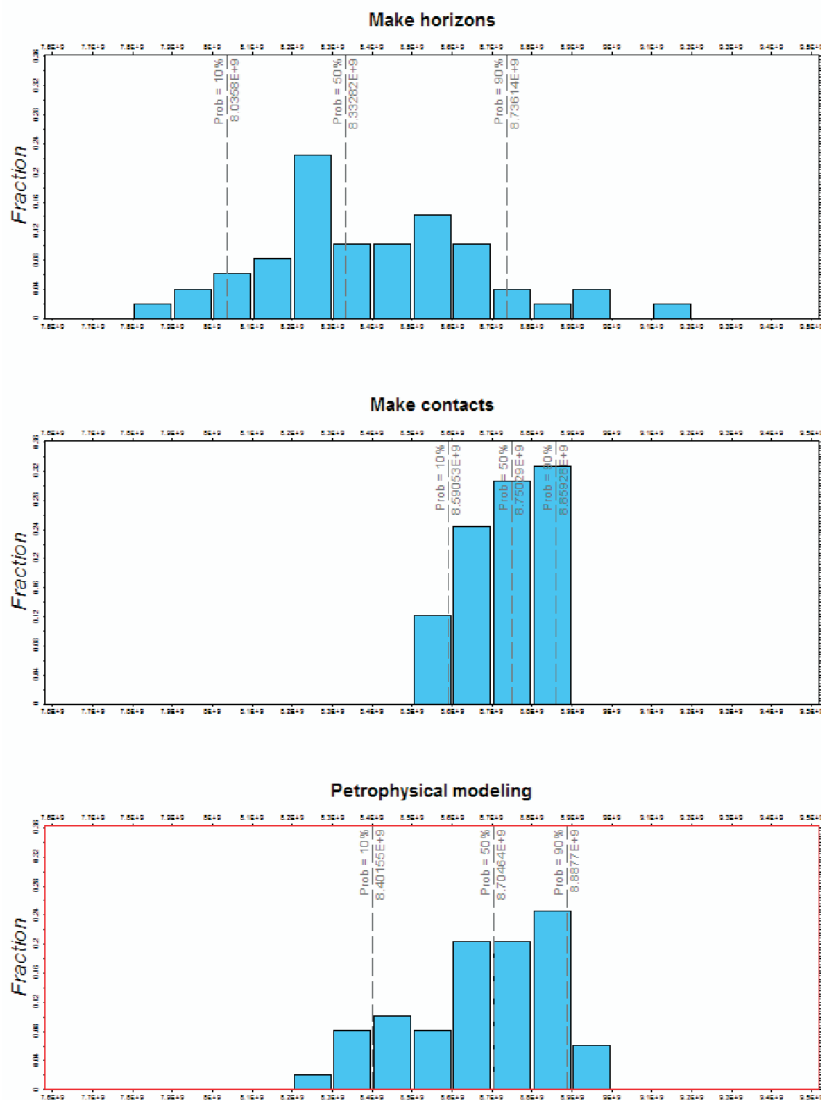


**Rys. 7.** Przykład wyników symulacji Monte Carlo dla jednego z analizowanych obiektów złożowych



wykonanych realizacji) lokuje się poniżej tej wartości, natomiast 90% powyżej tej wartości; P50 – wielkość zasobów dzieląca populację wyników na dwie równe części (mediana rozkładu); P90 – wielkość zasobów, dla której 90% wyników jest od niej mniejsza, zaś 10% większa. Tak więc wielkość zasobów odpowiadająca P50 lokuje się w środku przedziału i przyjmuje się, że jest to wynik najbardziej prawdopodobny.

Dla modeli bazowych analizowanych obiektów złożowych przeprowadzono studium wrażliwości, pozwalające określić indywidualny wpływ poszczególnych czynników, zdefiniowanych jako obciążone niepewnością, na zmienność wyniku obliczenia zasobów, tj. obrazujące w jakim stopniu zmienność rezultatu tylko jednego procesu obliczeniowego (np. głębokości położenia konturu wodnego) rzutuje na wielkość obliczonych zasobów geologicznych (rysunek 8).



**Rys. 8.** Przykład efektów studium wrażliwości wyników obliczeń objętościowych na zdefiniowane czynniki niepewności (opis osi jak na rys. 7; wykres górny – niepewność strukturalna, środkowy – niepewność położenia konturu wody złożowej, dolny – niepewność parametrów obliczania przestrzennych modeli petrofizycznych)

### Podsumowanie

Analiza niepewności stanowi uzupełnienie oceny obiektu złożowego, gdyż pozwala na oszacowanie skali ograniczonej wiedzy interpretatora/ów odnośnie konstruowanych modeli złóż węglowodorów, a w konsekwencji

– wyników obliczeń objętościowych uzyskiwanych w oparciu o rozkłady parametrów petrofizyczno-złożowych.

Dysponując wartościami najbardziej prawdopodobnych (P50) zasobów złoża oraz wartościami „minimalnymi”

(P10) i „maksymalnymi” (P90), możliwe jest opracowanie kilku alternatywnych programów zagospodarowania i eksploatacji złoża, pozwalających na wczesne reagowanie i zmianę strategii w przypadku pojawienia się nowych danych (np. danych eksploatacyjnych).

Znając prawdopodobny zakres możliwej zmienności wielkości zasobów złoża węglowodorów (wynik symulacji Monte Carlo – rysunek 7, oś pozioma) oraz wpływu poszczególnych czynników ryzyka na szerokość tego

zakresu (studium wrażliwości – rysunek 8, oś pozioma), możliwe jest zaplanowanie takiego programu rozpoznania złoża (np. sejsmiki 4D, typy profilowań otworowych, analizy laboratoryjne), który pozwoli zawęzić przedział niepewności.

Wyniki analizy niepewności statycznego modelu złoża mogą też stanowić element studium ekonomicznej opłacalności zagospodarowania złoża i pozwalają wybrać najbardziej efektywny sposób eksploatacji.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Andrzej Kostecki

## Literatura

- [1] Bryant I., Malinverno A., et al.: *Understanding Uncertainty*. Oilfield Review, Autumn 2002.
- [2] Deutsch C.V.: *Geostatistical Reservoir Modeling*. Oxford University Press, 2002.
- [3] Doyen P.M.: *Seismic Reservoir Characterization. An Earth Modeling Perspective*. EAGE Publications, 2007.
- [4] Gringarten E.: *Uncertainty Assessment in 3D Reservoir Modeling: an Integrated Approach*. Earth Decision Sciences, 2002.
- [5] Jędrzejowska-Tyczkowska H. i in.: *Analiza efektywności zróżnicowanych zbiornikowych atrybutów sejsmicznych typu przestrzennego w procesie tworzenia geostatystycznych modeli złóż w kolektorach węglanowych*. INiG, Kraków 2005.
- [6] Jędrzejowska-Tyczkowska H., Malaga M., Wolnowski T., Zuławiński K.: *Sejsmicznie konsystentne estymatory złoża węglowodorów*. Projekt nr 9T12A031114, INiG, Kraków 2000.
- [7] Petrel: *Process Manager and Uncertainty Analysis Course*. Schlumberger 2007.
- [8] Petrel: *Property Modeling Course*. Schlumberger 2007.
- [9] Sowiżdżał K.: *Analiza niepewności i ocena ryzyka w petrofizyczno-facjalnym modelowaniu struktur złożowych*. INiG, Kraków 2008 (praca niepublikowana).

Mgr inż. Krzysztof SOWIŹDŻAŁ – absolwent Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH, o specjalności geologia naftowa i geotermia. Od 2003 roku pracownik Instytutu Nafty i Gazu; w latach 2003-2006 zatrudniony w Zakładzie Inżynierii Naftowej; od 2006 roku do chwili obecnej w Zakładzie Geologii i Geochemii. Zajmuje się zagadnieniem konstrukcji przestrzennych, statycznych modeli złóż węglowodorów oraz obszarów poszukiwawczych.

## ZAKŁAD GEOLOGII I GEOCHEMII

### Zakres działania

- analiza systemów naftowych (badania skał macierzystych, modelowanie generacji, ekspulsji i migracji węglowodorów, analiza dróg migracji, analiza parametrów zbiornikowych pułapek złożowych);
- badania prospekcyjne (trendy przestrzennego rozwoju parametrów zbiornikowych i filtracyjnych, analiza macierzystości, ranking stref zbiornikowych);
- konstrukcja statycznych modeli geologiczno-złożowych 3D;
- analiza procesów diagenetycznych i ich wpływu na parametry zbiornikowe skał;
- genetyczna korelacja płynów złożowych ze skałami macierzystymi;
- obliczanie zasobów złóż węglowodorów z analizą niepewności;
- modele przepływu płynów złożowych w skałach zbiornikowych;
- badania ekshalacji gazu;
- badania złóż typu tight/shale gas;
- specjalistyczne analizy: przestrzeni porowej, petrograficzne, geochemiczne RSO, płynów złożowych, analizy biomarkerów, analizy chromatograficzne, analiza GC/MS, GC/MS/MS;
- interpretacja danych geofizyki wiertniczej.

**Kierownik:** dr inż. Grzegorz Leśniak

**Adres:** ul. Lubicz 25A, 31-503 Kraków

**Faks:** 12 430-38-85

**Telefon:** 12 421-00-33 wew. 262

**E-mail:** grzegorz.lesniak@inig.pl