

Karolina Pirowska
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

Ocena niepewności rozwiązania w modelowaniu zmienności przestrzennej parametrów ośrodka za pomocą metody kosymulacji

Wstęp

Ważnym aspektem stosowania narzędzi estymacji czy symulacji geostatystycznej do szacowania parametrów ośrodka geologicznego jest potrzeba omówienia, oceny i modelowania niepewności otrzymanych wyników. Już na początku trzeba wyszczególnić niepewność związaną z danymi. W pracy z danymi geologicznymi, geofizycznymi czy sejsmicznymi niedokładność spowodowana jest tym, że zwykle posiadamy ograniczoną wiedzę o bardzo skomplikowanej strukturze ośrodka. Surowe dane muszą być przetworzone lub interpretowane, pojawiają się założenia o modelach, decyzje podczas interpretacji itp. Pojawia się także niepewność związana z modelem – często dane nie są bezpośrednim wynikiem pomiarów, mogą istnieć alternatywne interpretacje, różne geologiczne scenariusze. Ocena niepewności staje się bardzo subiektywnym zadaniem. Każda ocena niepewności powinna być przeprowadzona w oparciu o założony model. W rezultacie można wskazać jedynie pewien model niepewności i nigdy nie ma gwarancji, czy jest on najlepszy. Dlatego ocena niepewności jest jednym z najtrudniejszych i często kontrowersyjnych zagadnień w przemyśle nafty i gazu. Niestety precyzyjne i solidne oszacowanie niepewności jest konieczne w podejmowaniu decyzji [1].

Ogólnie w statystyce przyjmuje się, że prawdziwa wartość zmiennej losowej jest z 68% pewnością równa średniej wartości, plus/minus odchylenie standardowe. W przedziale dwukrotnie większym od odchylenia standardowego mieści się już 95,5% wartości danego parametru. Intuicyjnie wiadomo, że obszary, gdzie próbki są gęsto rozmieszczone, są obciążone mniejszą niepewnością, natomiast z obszarami,

gdzie próbki są rzadko rozmieszczone, wiąże się większa wątpliwość. Jednak w przypadku metod geostatystycznych, jak kriging czy symulacja, gdzie mamy do czynienia z funkcjami losowymi czy zmiennymi losowymi wielowymiarowymi, taka prosta ocena staje się niewystarczająca. Potrzebne są narzędzia oceny poprawności przyjętych rozkładów, wariogramów, parametrów estymacji i symulacji. Dużym problemem jest fakt, że przestrzenna zmienność wielu systemów na ziemi nie jest dobrze opisana za pomocą wariogramu, tzn. bardzo różne wzory (rozkłady wartości parametru) mogą mieć taki sam wariogram.

W przypadku symulacji użytkownik zmuszony jest do zmierzenia się z niepewnością reprezentowaną przez wiele wygenerowanych realizacji. Ocena niepewności może zostać przeprowadzona w oparciu o obliczenie następujących rozkładów (map) [2]:

- rozkład wartości średniej – estymacja typu „E” (z ang. *expected value*) – średnia z wszystkich realizacji liczona punkt po punkcie,
- rozkład wariancji – wariancja z rozkładu warunkowego,
- rozkład prawdopodobieństwa – prawdopodobieństwo przekroczenia ustalonego progu, średniej wartości powyżej lub poniżej tego progu,
- wartość, przy której ustalona wartość p skumulowanego rozkładu warunkowego jest osiągnięta (warunkowa wartość kwantyla p).

Komentarza wymagają dwa pierwsze rozkłady, które mogą bardzo przypominać wyniki krigingu – mapę wartości danego parametru estymowanych krigingiem, wraz z wariancją krigingu. Rzeczywiście kriging dostarcza

szybszej i bezpośredniej estymacji mapy podobnej do mapy typu „E”, ale nieidentycznej i nie ma możliwości policzenia innych typów oszacowania. Natomiast wariancja krigingu nie jest miarą dokładności estymatora, jakim jest kriging, ponieważ wariancja nie zależy od wartości

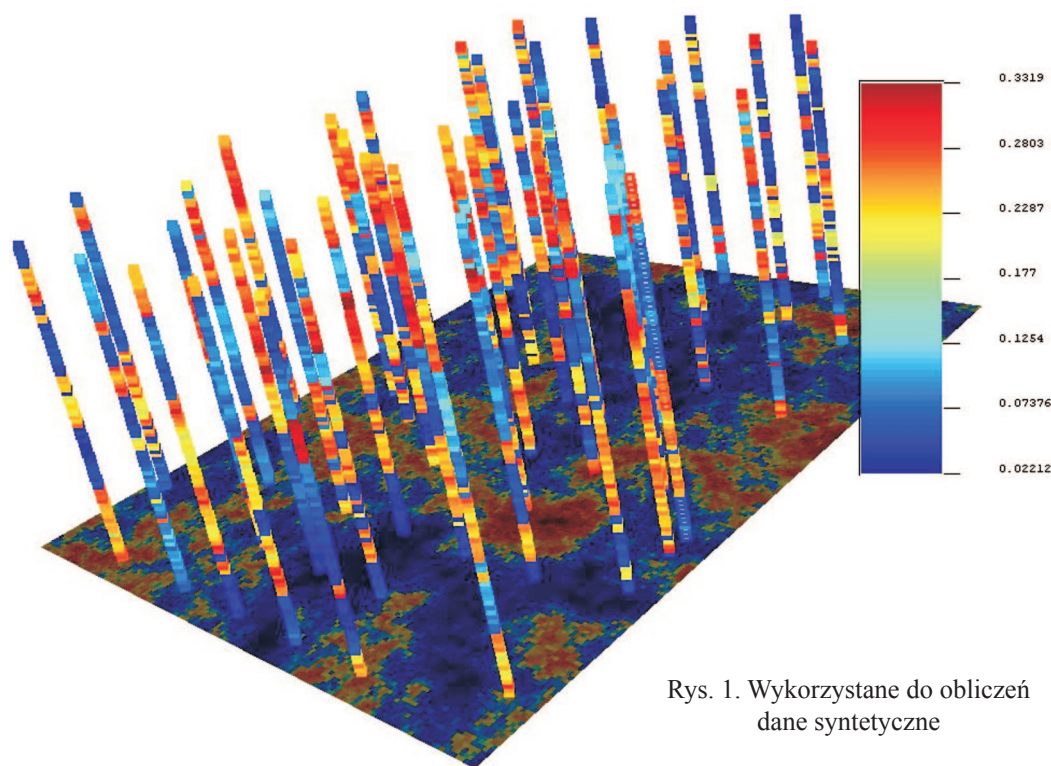
danych, a jedynie od przestrzennej konfiguracji zbioru danych i przyjętego modelu kowariancji. Znacznie lepszą miarą potencjalnego błędu związanego z estymacją krigingiem może być warunkowa wariancja błędu obliczona na podstawie L realizacji (L oznacza liczbę realizacji) [4].

Modelowanie porowatości za pomocą metody kosymulacji sekwencyjnej Gaussa

Do obliczeń wykorzystane zostały dane syntetyczne dostępne wraz z oprogramowaniem SGeMS w projekcie Stanford6.prj. Z projektu wyeksportowano dane otworowe (well_sample), a następnie zaimportowano je do nowego projektu. Dane syntetyczne składają się z 46 otworów, rozprzestrzenionych na obszarze 150 na 200 [jednostek, np. metry]. W każdym otworze dane są: impedancja akustyczna, prędkość v_p , gęstość, facja, porowatość i przepuszczalność (po 80 próbek). Na rysunku 1 przedstawiono otwory wraz z wartościami porowatości w każdym z otworów.

wydobyciem surowców czy przemysłem paliwowym. W oprogramowaniu SGeMS dostępna jest m. in. procedura kosymulacji sekwencyjnej Gaussa o nazwie COSGSIM, której wyniki zaprezentowano w niniejszej publikacji, oraz procedura POSTSIM, której użyto do analizy niepewności rozwiązania.

Metoda kosymulacji sekwencyjnej Gaussa należy do zbioru technik statystycznych, opartych o teorię funkcji losowych, uwzględniających w analizie danych ich lokalizację przestrzenną i czasową. Za pomocą metod symu-



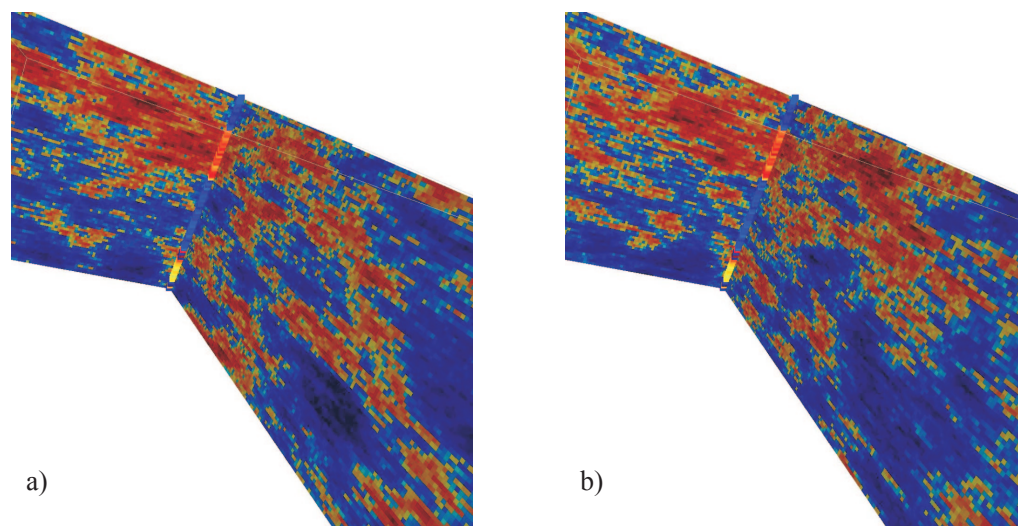
Rys. 1. Wykorzystane do obliczeń dane syntetyczne

Wymienione oprogramowanie SGeMS – *The Stanford Geostatistical Modeling Software* [3] jest pakietem programów (z dostępem do kodów źródłowych) umożliwiającym zastosowanie metod geostatystycznych. Oprogramowanie zostało stworzone w oparciu o istniejącą wcześniej, ogólnodostępną bibliotekę geostatystyczną GSLib [2]. Pakiet dostarcza narzędzi, z którego mogą korzystać studenci i naukowcy z dziedziny nauk o ziemi, jak i praktycy zajmujący się zagadnieniami związanymi ze środowiskiem,

lacji możliwa jest identyfikacja i modelowanie struktury przestrzennej lub czasowej danego zjawiska lub obiektu, przedstawienie alternatywnych rozwiązań. W odróżnieniu od symulacji kosymulacja bazuje nie tylko na zmiennej głównej, której wartość znamy zazwyczaj w niewielu punktach, a chcemy oszacować na całym obszarze, ale również potrzebna jest zmienna dodatkowa, która pozostaje w relacji ze zmienną główną i która jest znacznie gęściej opróbkowana.

Obiektem zainteresowania była estymacja porowatości, natomiast parametrem dodatkowym, na którym opierały się obliczenia, była impedancja akustyczna. Obliczenia przeprowadzono, korzystając z danych dotyczących porowatości pochodzących z 30 otworów,

natomiast 16 kolejnych traktowano jako dane weryfikujące. Zmienna dodatkowa znana była we wszystkich 46 otworach. Przeprowadzono kosymulację w wersji pełnego kokrigingu. Na rysunku 2 przedstawiono dwie przykładowe realizacje.

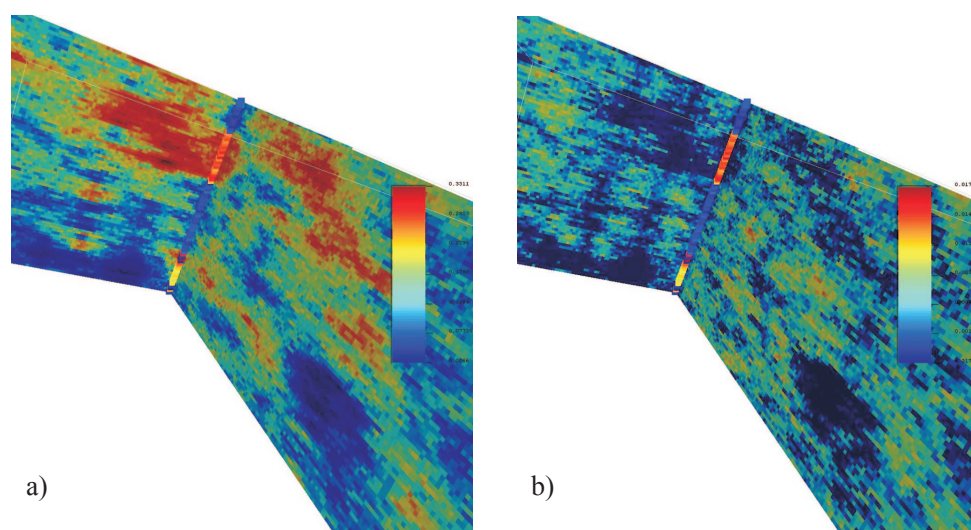


Rys. 2. Przykładowe realizacje wraz z poszukiwanymi wartościami porowatości z otworu testowego nr 9. Widać, że oszacowane w wyniku kosymulacji z pełnym kokrigingiem wartości porowatości dobrze przybliżają wartości testowe (nieco gorsze przybliżenie na dużych głębokościach). Poszczególne realizacje różnią się od siebie. Skala wartości porowatości rozciąga się od 0,022 (kolor niebieski) do 0,332 (kolor czerwony).

Przykład oszacowania niepewności wyniku kosymulacji sekwencyjnej Gaussa

Analizę niepewności rozwiązania przeprowadzono w oparciu o program POSTSIM. Za jego pomocą można dla

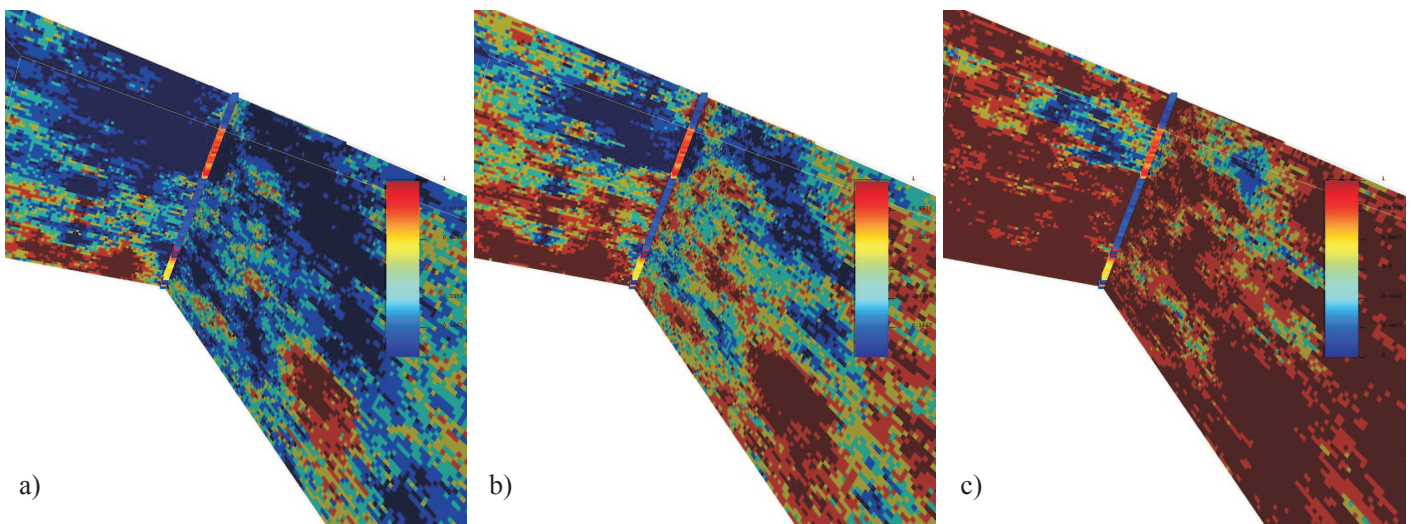
wszystkich realizacji obliczyć średnią wartość porowatości dla danego punktu oraz wariancję warunkową (rysunek 3).



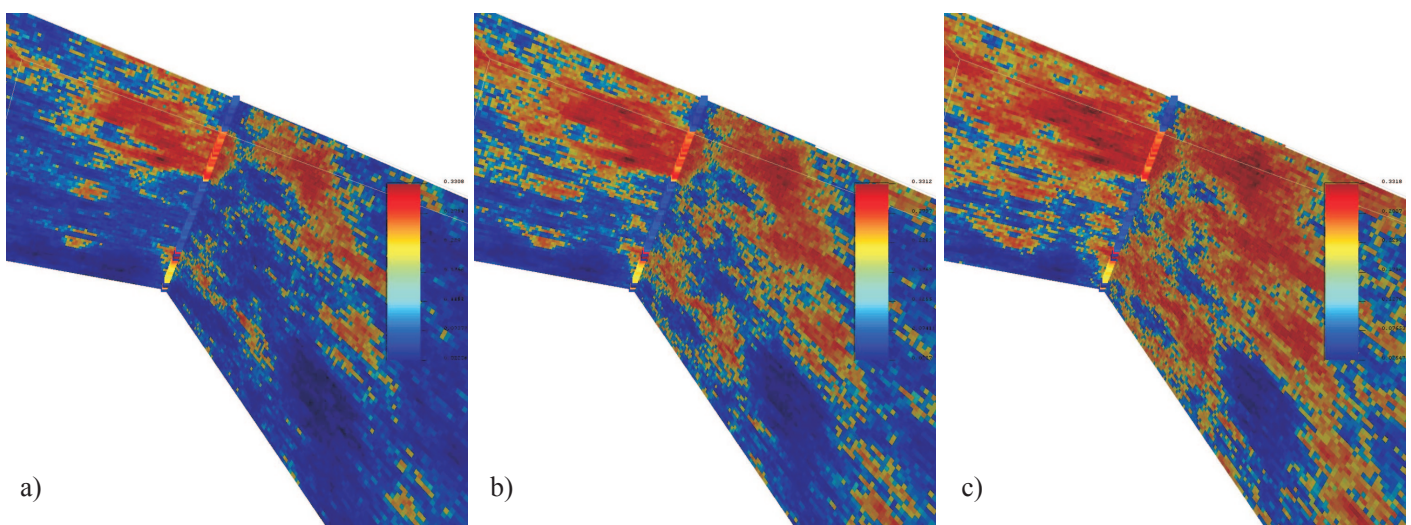
Rys. 3. Mapa średnich wartości porowatości [rysunek a – po lewej stronie, skala wartości porowatości średniej wynosi od 0,0266 (kolor niebieski) do 0,3311 (kolor czerwony)] oraz mapa wariancji warunkowej [rysunek b – po prawej stronie, skala od 0,0003 (kolor niebieski) do 0,0175 (kolor czerwony)] obliczone dla wszystkich realizacji. Średnie wartości porowatości w pobliżu otworu testowego dobrze przybliżają wartości testowe, wariancja jest mała dla fragmentów, gdzie wartość porowatości przyjmuje wysokie wartości, wariancja wzrasta w miejscach, gdzie wartość porowatości przyjmuje niskie wartości.

Innymi pomocnymi rozkładami mogą być rozkłady prawdopodobieństwa (rysunek 4), które wskazują prawdopodobieństwo, że porowatość ma wartość mniejszą od danego progu, rozkłady dla wybranych kwantyli (rysunek 5) czy rozkłady powstałe po odcięciu punktów, w których porowatość przewyższa zadany próg. Do analizy posłużono się wynikami kosymulacji w lokalizacji jednego z otworów

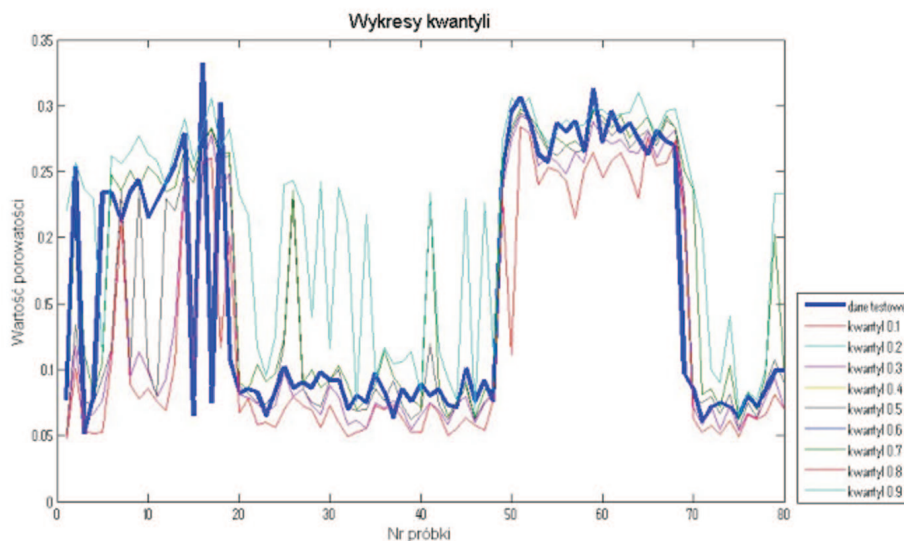
testowych – otworu testowego nr 9. Analizując wykresy kwantyli rzędu 0,1; 0,2; ...; 0,9, można wskazać fragmenty, gdzie uzyskuje się niemalże pewność, że porowatość będzie miała wartość z przedziału [0,25; 0,3] (próbki nr 52-68) oraz fragmenty, gdzie można mieć 70% pewności, że porowatość będzie miała wartość z przedziału [0,047; 0,11] (próbki nr 27-40).



Rys. 4. Mapy prawdopodobieństwa. Kolorem niebieskim zaznaczone są obszary, gdzie prawdopodobieństwo jest bliskie 0, kolorem czerwonym – prawdopodobieństwo jest bliskie 1. Porównanie z wartościami testowymi pozwala stwierdzić, że mapy prawdopodobieństw dobrze odzwierciedlają rzeczywistość. Rysunek a – mapa prawdopodobieństwa, że wartość porowatości będzie niższa od 0,07. Prawdopodobieństwo jest wysokie w fragmentach, gdzie wartość porowatości jest niska. Natomiast w fragmentach, gdzie wartość porowatości jest wysoka, prawdopodobieństwo jest bliskie 0. Rysunek b – mapa prawdopodobieństwa, że wartość porowatości będzie niższa od 0,17. Mapa niewiele różni się od wcześniejszej – obszary niskiego, wysokiego prawdopodobieństwa nieco powiększają się. Rysunek c – mapa prawdopodobieństwa, że wartość porowatości będzie niższa od 0,27. Zgodnie z wartościami testowymi fragmentom, gdzie porowatość ma bardzo dużą wartość, zostało przyporządkowane prawdopodobieństwo bliskie 0.



Rys. 5. Mapy kwantyli. Rysunek a – rozkład kwantyla rzędu 0,25 dla wartości porowatości. Rysunek b – rozkład kwantyla rzędu 0,5 dla wartości porowatości. Rysunek c – rozkład kwantyla rzędu 0,75 dla wartości porowatości. Skala tak ja dla wartości porowatości wynosi od 0,022 (kolor niebieski) do 0,331 (kolor czerwony).



Rys. 6. Zbiorecy wykres kwantyli (rzędu 0,1; 0,2; ...; 0,9) dla otworu testowego nr 9 wraz z poszukiwaną wartością porowatości

Podsumowanie

Ocena niepewności rozwiązania powinna być zawsze dołączona do wyniku przeprowadzonych symulacji. Jest to jedno z trudniejszych zadań przy zastosowaniu metod symulacji. Dużymi błędami i niedokładnością mogą być obarczone już na wstępie dane wejściowe. Niepewność rozwiązania mogą również zwiększać nieprawidłowo dobrane wariogramy modelowe i parametry symulacji czy kosymulacji. Przy analizie i ocenie realizacji pomocne jest obliczenie wartości średniej, wariancji warunkowej, rozkładów prawdopodobieństwa, rozkładów kwantyli czy map odcięcia. Najbardziej przemawiająca, według autorki, wydaje się być analiza map kwantyli. W literaturze, na której bazowano w niniejszej pracy, nie spotkano się z tego typu szczegółową analizą. Porównując wartości kwantyli poszczególnych rzędów, można wskazać w dowolnym punkcie obszaru przedziały koncentracji

wartości porowatości (obliczone na podstawie wszystkich realizacji). W przeprowadzonych obliczeniach udało się uzyskać do 60-70% pewności, że porowatość należy do danego przedziału wartości. Trzeba jednak pamiętać, że nawet tak wysokie prawdopodobieństwo nie daje gwarancji i może się zdarzyć, że prawdziwa wartość będzie spoza przedziału.

W mocy pozostaje zasada, że im lepszymi danymi dysponujemy, tym pewniejsze i solidniejsze są wyniki symulacji czy kosymulacji. Niestety w praktyce trudno o pozbawione błędów, równomiernie rozprzestrzenione dane, a najlepiej jeśli posiadamy jeszcze dodatkowe dane, które można włączyć do obliczeń. Być może należy tu upatrywać przyczyny tego, że na gruncie polskim potencjał geostatystycznych metod symulacji czy kosymulacji wciąż jeszcze pozostaje niedoceniony i słabo wykorzystany.

Literatura

- [1] Caers J.: *Petroleum Geostatistics*. „Society of Petroleum Engineers” 2005.
- [2] Deutsch C. V., Journel A.: *GSLIB Geostatistical Software Library and User's Guide*. Oxford University Press 1998.
- [3] <http://sgems.sourceforge.net> – strona oprogramowania SGems.
- [4] Remy N., Boucher A., Wu J.: *Applied Geostatistics with SGeMS*. Cambridge University Press 2009.
- [5] Remy N.: *Geostatistical Earth Modeling Software: User's Manual*, 2004.



Mgr Karolina PIROWSKA – absolwentka kierunku Matematyka na Uniwersytecie Jagiellońskim, specjalizacja: Zastosowania Matematyki. Od lutego 2007 roku pracownik Zakładu Sejsmiki Instytutu Nafty i Gazu w Krakowie. Zajmuje się zastosowaniem metod optymalizacji stochastycznej w rozwiązaniu odwrotnego zadania kinematycznego w metodzie sejsmicznej.