

ZASTOSOWANIE SYMULACJI GEOSTATYSTYCZNEJ DO OCENY DEFICYTÓW ROZPOZNANIA ZŁOŻA

ASSESSMENT OF THE DEFICITS IN THE DEPOSIT RECOGNITION USING GEOSTATISTICAL SIMULATION

Wojciech Naworyta - Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie

W artykule przedstawiono jedną z możliwości wykorzystania symulacji geostatystycznej do oceny deficytów rozpoznania złoża. Zaproponowane w artykule rozwiązanie jest możliwe wyłącznie przy wykorzystaniu symulacji geostatystycznej. We wstępie opisano właściwości metod interpolacyjnych z podkreśleniem symulacji. Przedstawiono procedurę jednej z metod symulacyjnych - Warunkowej Sekwencyjnej Symulacji Gaussa. Na podstawie jednego ze złóż węgla brunatnego przedstawiono studium przypadku. Metodą symulacji modelowano miąższość złoża M [m] – ważny parametr, na podstawie którego szacuje się wielkość zasobów. Dla porównania model wykonano również metodą krigingu zwyczajnego. Szczególną uwagę poświęcono mapie rozkładu odchylenia standardowego symulacji, na podstawie której zidentyfikowano obszary o dużej wartości błędu. Obszary o podwyższonej wartości odchylenia standardowego powinny być traktowane priorytetowo w kolejnych fazach dokumentowania złoża. Identyfikacja deficytów rozpoznania umożliwia optymalne lokowanie środków przeznaczonych na prace geologiczne.

Słowa kluczowe: symulacja geostatystyczna, sekwencyjna symulacja Gaussa, dokumentowanie złoża

The article presents a possibility of geostatistical simulation application to assess the deficits in the deposit recognition. The only interpolation method, which can be used for such purpose is the geostatistical simulation. In the introduction of the article the properties of interpolation methods, with special emphasis on geostatistical simulation were summarized. The procedure of the Conditional Sequential Gaussian Simulation method was described. Basing on the exploration data of one lignite deposit a case study with the application of simulation was presented. Using simulation method the thickness M [m] of the deposit - an important parameter, used for reserves estimation, was modeled. For comparison reason, the second model using ordinary kriging was performed. Particular attention was paid to the distribution of the standard deviation of models. Based on the standard deviation map the areas of higher error value were identified. The areas of higher model error should be better recognized in the future phase of the deposit recognition. The result of the geostatistical simulation allows for optimal placement of funds allocated for geological works.

Keywords: geostatistical simulation, sequential Gaussian simulation, documentation deposits

Wstęp

Modelowanie to pierwszy i bardzo istotny element procesu projektowania górnictwa. Model złoża jest podstawą do podejmowania decyzji inwestycyjnych dotyczących przygotowania eksploatacji albo jej zaniechania. Od jego jakości zależy, czy decyzje inwestycyjne przyniosą korzyść czy wręcz przeciwnie. Błędy popełnione na etapie modelowania będą konsekwentnie przenoszone na każdy następny etap inwestycji górniczej, a błędne decyzje podejmowane na podstawie niedoskonałego modelu mogą skutkować wielomilionowymi stratami.

Geolog podejmujący się procesu modelowania ma do dyspozycji informację pierwotną w postaci liczb reprezentujących parametry złoża w otworach rozpoznawczych. Otwory rozwierca się najczęściej w nieregularnej siatce. Koszty rozpoznania złoża są wysokie dlatego otworów rozpoznawczych z punktu widzenia potrzeb modelowania złoża jest najczęściej

za mało. Informacja pozyskana w toku prac geologicznych jest jedynym źródłem informacji służącym do modelowania złoża. Zadaniem projektanta jest możliwie pełne wykorzystanie dostępnej informacji o złożu.

Jedną z najbardziej użytecznych form modelowania cech złożowych są mapy izoliniowe (mapy izarytm), które obrazują charakter zmienności parametru złożowego. Dla ich wykonania konieczne jest przeprowadzenie interpolacji znanych wartości parametrów złożowych (obserwacji) do regularnej siatki interpolacyjnej obejmującej całą powierzchnię złoża. Interpolację można przeprowadzić na wiele sposobów. Obecnie do interpolacji najczęściej stosuje się specjalistyczne programy komputerowe, w których zaimplementowane są różne metody interpolacyjne, wśród nich: metoda odwrotnej odległości do potęgi, metoda minimum krzywizny, metoda Shepard'a, metoda wielomianów, metoda średniej kroczącej itp. Osobną grupę stanowią metody oparte na założeniach geostatystycznych. Te

ostatnie, oparte na założeniach funkcji losowych, pozwalają oszacować wartości średnie w węzłach siatki, dostarczają też informacji o wiarygodności modelu, umożliwiają również oszacowanie wielkości błędu pomiarowego, jaki tkwi w informacji pierwotnej. Najbardziej popularnym narzędziem z arsenału metod geostatystycznych jest kriging, rzadziej do rozwiązywania zadań geologiczno-górnictwa stosuje się geostatystyczne metody symulacyjne.

Symulacja geostatystyczna ma wiele zastosowań. Znacznie różni się od krigingu. Kriging dostarcza informacji o najbardziej prawdopodobnym przebiegu modelowanego zjawiska (np. parametru złożowego) podczas gdy w przypadku symulacji otrzymuje się warianty możliwe, prawdopodobne ale niekoniecznie najbardziej prawdopodobne. Metoda ta przydatna jest szczególnie do oceny ryzyka przekroczenia założonych poziomów krytycznych. Stosując symulację można osiągnąć wszystkie zadania, dla których stosuje się kriging, umożliwia dodatkowo rozwiązanie wielu innych problemów. Przedmiotem publikacji jest przykład zastosowania symulacji geostatystycznej do wyznaczenia obszarów złoża, w których model cechuje się znacznie mniejszą wiarygodnością niż w innych rejonach. Na podstawie takiej informacji można z większą precyzją planować dodatkowe kosztowne prace geologiczne przewidziane do wykonania na kolejnych etapach zagospodarowania złoża w celu dokładniejszego rozpoznania zmienności jego parametrów. W przypadku, gdy dodatkowe prace rozpoznawcze nie mogą być wykonane to na podstawie wyników analizy wykazane rejony złoża należy traktować z mniejszą dozą zaufania jako takie, w których błędy modelu mogą być większe niż w innych obszarach. Temat został dobrany celowo ponieważ ilustruje różnice między metodą krigingu a symulacją geostatystyczną na korzyść tej ostatniej.

O symulacji geostatystycznej

W wyniku stosowania metod interpolacyjnych otrzymuje się wartości w siatce interpolacyjnej, które można analizować wykorzystując różne sposoby wizualizacji – za pomocą map izolinowych, map rastrowych, map 3D, map gradientów itp. W odróżnieniu od klasycznych metod interpolacyjnych symulacja dostarcza nie jeden wynik (model złoża) ale zestaw wyników, których liczba definiowana jest dowolnie przez operatora. Obrazy złoża otrzymane w procesie symulacji określa się mianem realizacji. Każda realizacja jest inna i każda jest prawdopodobnym modelem rzeczywistego złoża. Zmienność parametru złożowego w każdej z realizacji cechuje struktura wynikająca z modelu wariogramu, jaki został dopasowany do wariogramu empirycznego obliczonego na podstawie obserwacji.

Popularne są dwie metody symulacji geostatystycznej – metoda Turning Bands [3] oraz Sekwencyjna Symulacja Gaussa (SSG) [2, 6, 9, 14]. Trudno wskazać, która z nich jest lepsza. Opinie wśród geostatystyków są podzielone. Obydwie metody prowadzą do podobnych wyników, wykorzystują model wariogramu oraz generator liczb losowych, jednak sam mechanizm działania metod bardzo się różni.

Symulację geostatystyczną można wykonać w wersji warunkowej i bezwarunkowej. Z oczywistych względów dla analiz z dziedziny górnictwa i geologii najczęściej stosuje się symulację warunkową w oparciu o obserwacje parametrów złoża. Każda realizacja symulacji honoruje wartości parametrów w miejscach obserwacji. W praktyce jednak pojedyncze

realizacje będą się różniły nieznacznie w miejscach obserwacji. Wynika to stąd, że realizacje wykonuje się w węzłach siatki interpolacyjnej, a te najczęściej nie pokrywają się ze współrzędnymi obserwacji.

W istocie symulacja geostatystyczna, niezależnie od metody, opiera się na idei krigingu, a to co odróżnia tę technikę od krigingu jest wprowadzenie elementów gry losowej na pewnych etapach procesu obliczeniowego. Nie sposób zrozumieć symulację bez zrozumienia idei krigingu. Kriging został wystarczająco dobrze opisany w literaturze, dlatego w niniejszej publikacji zrezygnowano z przedstawiania tej metody odwołując się do licznych źródeł [1, 4, 5, 7, 8, 10, 11, 12, 13]. Mimo, że symulacja geostatystyczna z krigingiem ma wiele wspólnego to przez wprowadzenie elementu losowości udało się skompensować wiele niedostatków krigingu. Pokazano to na studium przypadku z zastosowaniem Warunkowej Sekwencyjnej Symulacji Gaussa. Nazwa metody wskazuje, że procedura przeprowadzana jest w sekwencjach i operuje na liczbach charakteryzujących się rozkładem normalnym. Rzeczywiście przed wykonaniem symulacji konieczna jest transformacja danych do zbioru wartości, które cechują się rozkładem normalnym. W procesie transformacji modeluje się funkcję anamorfozy by na ostatnim etapie wykonać transformację odwrotną otrzymanych wartości z powrotem do zbioru danych, których rozkład zbliżony jest do pierwotnego (rys. 2).

Wykorzystując znormalizowane wartości obserwacji oblicza się wariogram empiryczny, do którego dopasowuje się właściwy model. Ten znormalizowany model wariogramu będzie wykorzystywany w procedurze symulacyjnej.

W pierwszym kroku procedury program losowo wybiera węzeł siatki interpolacyjnej. To pierwszy raz, gdy zastosowany zostaje generator liczb losowych. W wylosowanym węźle na podstawie obserwacji, metodą krigingu zwyczajnego oblicza się wartość średnią m_1 oraz odchylenie standardowe krigingu s_1 , w wyniku czego w wylosowanym węźle siatki interpolacyjnej zdefiniowana została zmienna o rozkładzie z wartością średnią i odchyleniem standardowym $Z_1(m_1, s_1)$. W kolejnym kroku ze zbioru liczb o zdefiniowanym rozkładzie losowo wybrana zostaje wartość, którą przypisuje się do węzła siatki jako wynik symulacji z_1 . Tu generator liczb losowych został wykorzystany po raz drugi. W trzecim kroku losowo wybierany jest kolejny węzeł siatki interpolacyjnej. W tym węźle tak jak poprzednio metodą krigingu obliczana jest wartość średnia m_2 i odchylenie standardowe krigingu s_2 czyli zmienna $Z_2(m_2, s_2)$. Dla obliczenia tych wartości korzysta się nie tylko z obserwacji ale również z wartości z_1 traktując ją na równi z obserwacjami. Obliczenia w kolejnych, losowo wybranych węzłach siatki interpolacyjnej wykonywane metodą krigingu będą uwzględniały uprzednio wygenerowane metodą symulacji wartości w węzłach z_1, z_2, \dots, z_n . Dzięki temu otrzymana realizacja parametru w przestrzeni złoża będzie spełniała warunki autokorelacji wyznaczone przez zastosowany w symulacji model wariogramu.

Opisana procedura dotyczy wykonania jednego modelu złoża – jednej realizacji. Jedna realizacja złoża nie ma sensu interpretacyjnego, konieczne jest wykonanie co najmniej 20 modeli, aby na ich podstawie przeprowadzić analizę statystyczną. Procedura powtarzana jest tak długo aż osiągnięta zostanie liczba realizacji żądana przez operatora. Przez zastosowanie generatora liczb losowych sekwencja wykonywania obliczeń w poszczególnych węzłach siatki interpolacyjnej dla każdej z realizacji jest inna. Między innymi dzięki temu realizacje różnią

się między sobą, jednocześnie każda oparta jest na tym samym zestawie obserwacji i każda ma strukturę opisaną podobnym modelem wariogramu. Wierność struktury zostanie wykazana w studium przypadku.

Po wykonaniu wszystkich realizacji korzystając z funkcji anamorfozy transformuje się wygenerowane wartości z powrotem do zbioru wartości o rozkładzie zbliżonym do rozkładu pierwotnego.

Dla ułatwienia interpretacji wyników symulacji czyli zestawu kilkudziesięciu realizacji wykonuje się procedurę określaną mianem postprocessing'u, w której w każdym punkcie siatki interpolacyjnej na podstawie wszystkich realizacji oblicza się podstawowe cechy statystyczne. Kończącym efektem całej procedury symulacji są modele złoża: wartość średnia z realizacji, odchylenie standardowe, wzgl. wariancja, model minimalistyczny, model maksymalistyczny, mapy prawdopodobieństwa przekroczenia założonych poziomów. Materiał podstawowy jakim jest zestaw kilkudziesięciu realizacji otwiera duże możliwości interpretacyjne. Na podstawie modeli wynikowych można analizować scenariusze zagospodarowania złoża przyjmując różne możliwe warianty modelowanych parametrów złożowych.

Procedurę Warunkowej Sekwencyjnej Symulacji Gaussa można opisać w kolejnych etapach:

- I. Zdefiniowanie siatki interpolacyjnej.
- II. Transformacja obserwacji do zbioru wartości o rozkładzie normalnym $Z(m,s) \rightarrow Z_N(0,1)$, dopasowanie funkcji anamorfozy.
- III. Obliczenie wariogramu empirycznego dla obserwacji znormalizowanych i dopasowanie modelu wariogramu.
- IV. Właściwa procedura symulacji.
 1. Losowy wybór węzła siatki interpolacyjnej.
 2. Oszacowanie w wylosowanym węźle wartości średniej m_i i odchylenia standardowego s_i w procedurze krigingu zwyczajnego.
 3. Losowy wybór wartości z_i z rozkładu $Z_i(m_i, s_i)$ i przypisanie jej do węzła siatki jako wartość wynikowa.
 4. Powtórzenie etapów 1 – 3 aż do przypisania wszystkim węzłom siatki odpowiednich wartości z_i . W każdej kolej-

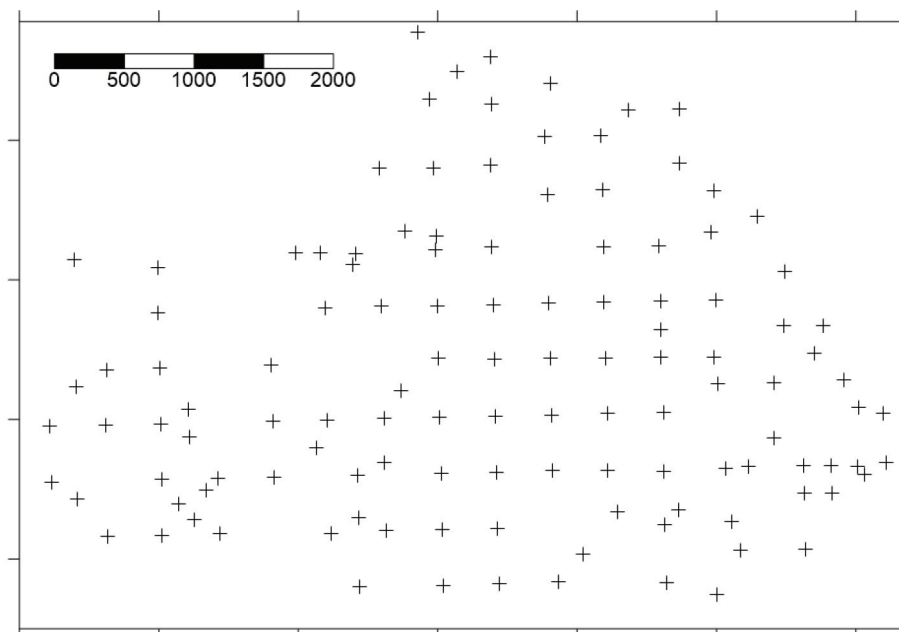
nej procedurze krigingu wykorzystuje się wygenerowane w poprzednich sekwencjach wartości z_i traktując je jak obserwacje.

5. Dla wykonania kolejnej realizacji powtarza się etapy 1-4.
- V. Transformacja powrotna wartości realizacji do zbioru wartości o rozkładzie pierwotnym $Z_N(0,1) \rightarrow Z(m,s)$, czyli odwrócenie kroku II.
- VI. Postprocessing zestawu realizacji.
- VII. Interpretacja wyników symulacji.

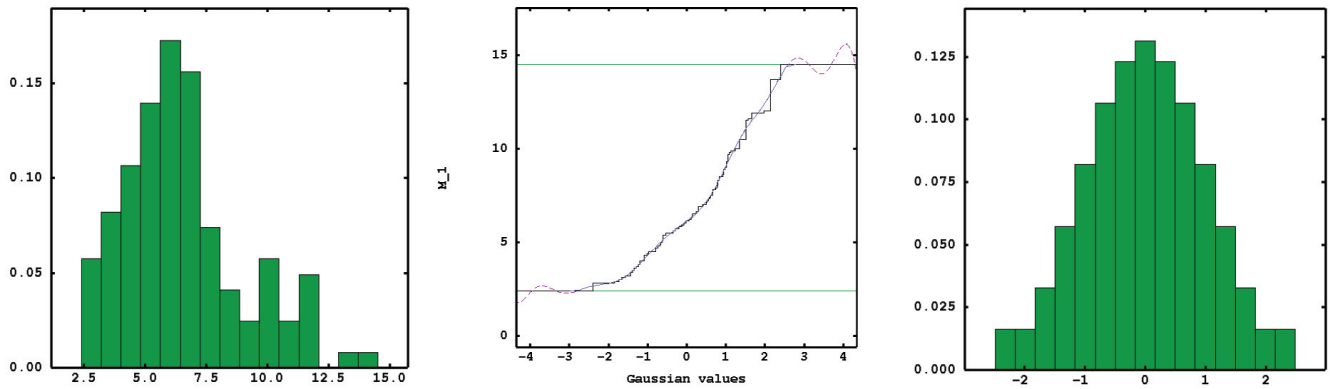
Do przeprowadzenia symulacji wykorzystuje się specjalistyczne programy komputerowe, niemniej cały proces nie przebiega automatycznie i na wielu etapach wymaga podjęcia właściwej decyzji. W opisanej procedurze dotyczy to etapów I, II, III, V, VI, i VII. Tylko właściwa procedura symulacji (etap IV) po przygotowaniu przebiega automatycznie.

Odchylenie standardowe symulacji geostatystycznej i krigingu

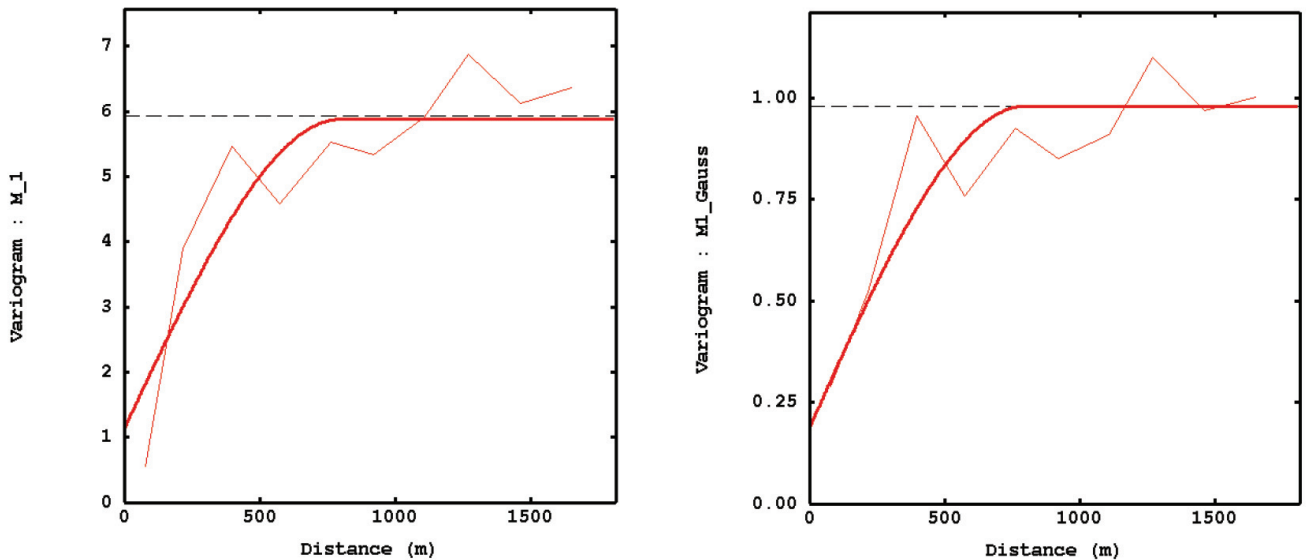
Efektom symulacji, zależnie od zakładanych celów, są mapy wartości średniej parametru złoża, wersje minimalistyczne, maksymalistyczne złoża, mapy prawdopodobieństwa. Ważnym wynikiem symulacji, bez którego nie sposób właściwie zinterpretować model jest mapa odchylenia standardowego. Odchylenie standardowe oblicza się w procedurze postprocessing'u na podstawie zestawu realizacji w wyniku analizy statystycznej wartości w każdym węźle siatki interpolacyjnej. Odchylenie standardowe symulacji nie jest tożsame z błędem krigingu. Wartość tego ostatniego zależy przede wszystkim od rozmieszczenia obserwacji w przestrzeni złoża, głównie od odległości pomiędzy obserwacjami. Oczywiście zmienność błędu krigingu w funkcji odległości od obserwacji zależy również od kształtu modelu wariogramu użytego w procedurze krigingu. Generalnie w rejonie gdzie gęstość otworów rozpoznawczych jest większa błąd krigingu osiąga wartości niższe niż w obszarach gdzie gęstość rozpoznania jest niska. Wartość odchylenia standardowego krigingu nie zależy od lokalnej



Rys. 1. Rozmieszczenie otworów rozpoznawczych w przestrzeni złoża
Fig. 1. Distribution of boreholes in the deposit



Rys. 2. Histogram miąższości złoża $M(l)$, funkcja anamorfozy, (śr), histogram obserwacji znormalizowanych $M_N(p)$
 Fig. 2. Histogram the seam thickness $M(l)$, the anamorphosis function (m), histogram of standardized observations $M_N(r)$



Rys. 3. Wariogramy i modele obliczone na podstawie obserwacji M (z lewej) oraz na podstawie danych znormalizowanych M_N (z prawej)
 Fig. 3. Variograms and models calculated on the observations $M(l)$ and on the standardized observations $M_N(r)$

zmienności obserwacji. Jest to wada krigingu. W znakomity sposób kompensuje ją symulacja, co zostanie przedstawione w studium przypadku.

Studium przypadku

Do zilustrowania problemu wykorzystano dane z jednego ze złóż węgla brunatnego. Analizowano miąższość złoża udokumentowaną w 122 otworach rozpoznawczych. Otwory rozmieszczono w dość regularnej siatce. Odległość między otworami wynosi średnio 500 metrów, rzadziej mniej. Na rysunku 1 pokazano rozmieszczenie otworów.

Analizie poddano jeden z ważniejszych parametrów złoża – miąższość pokładu M [m]. Od modelu tego parametru zależy dokładność oszacowania wielkości zasobów – czyli informacji

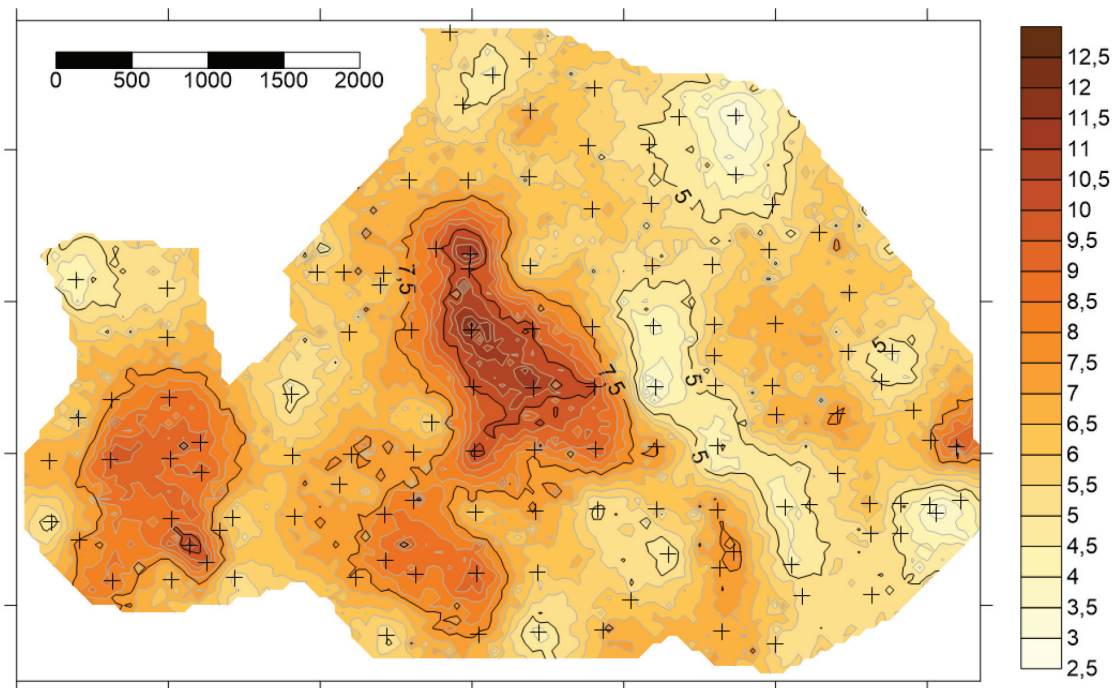
kluczowej dla oceny ekonomicznej projektu górniczego. W analizowanym przypadku miąższość pokładu przyjmuje wartości od 2,4 m do 14,5 m, średnio 6,6 m. Odchylenie standardowe wynosi 2,4 m.

Na podstawie obserwacji wykonano symulację metodą Warunkowej Sekwencyjnej Symulacji Gaussa postępując według schematu przedstawionego wcześniej. Na rysunku 2 pokazano histogram ilustrujący rozkład miąższości w złożu, rysunek 2 z prawej ilustruje histogram zbioru danych po transformacji do rozkładu normalnego. Rysunek 2 w środku przedstawia sposób transformacji oraz dopasowaną funkcję anamorfozy, która zostanie wykorzystana do transformacji powrotnej w V kroku postępowania.

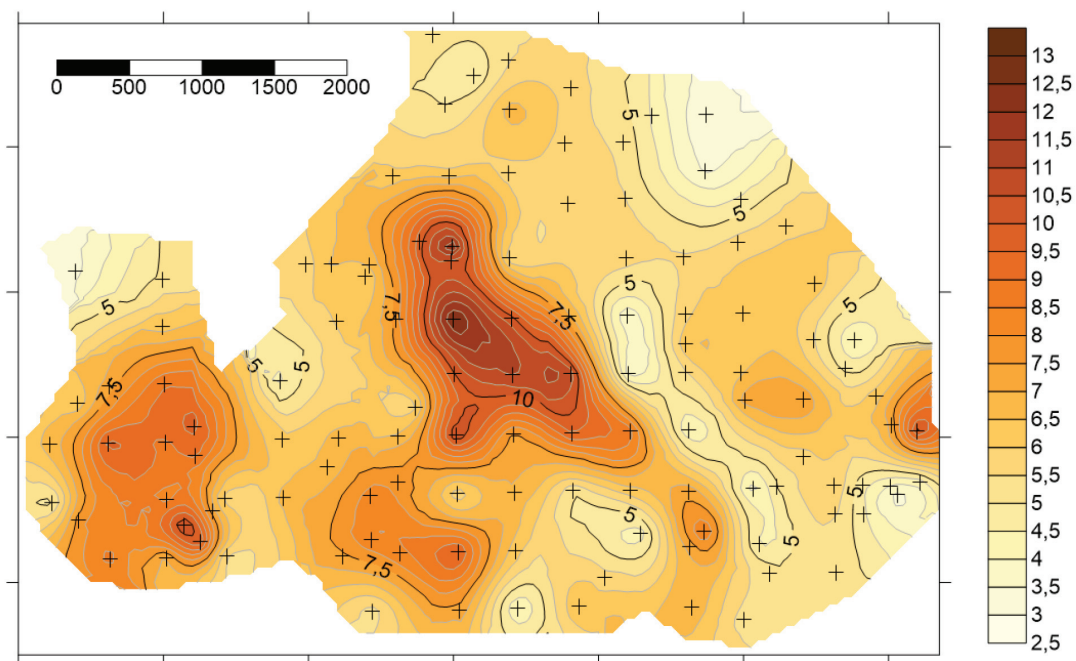
Na podstawie zbioru obserwacji znormalizowanych M_N obliczono wariogram empiryczny i dopasowano model. Na

Tab. 1. Parametry modeli wariogramów
 Tab. 1. Parameters of variogram models

	Model wariogramu miąższości pokładu M [m]	Model wariogramu zbioru danych znormalizowanych M_N [m]
Rodzaj modelu	sferyczny	sferyczny
Wartość wariogramu [m ²]	4,74	0,79
Wartość wariancji lokalnej [m ²]	1,14	0,19
Zasięg [m]	800	800



Rys. 4. Model miąższości złoża jako średnia z 25 realizacji symulacji geostatystycznej
 Fig. 4. Model of the seam thickness as the average of 25 realizations of geostatistical simulation



Rys. 5. Model miąższości złoża wykonany metodą krzygu zwyczajnego
 Fig. 5. Model of the seam thickness calculated with ordinary kriging method

rysunku 3 przedstawiono wariogram obliczony dla miąższości M na podstawie oryginalnych obserwacji oraz na podstawie zbioru danych znormalizowanych M_N . W tabeli 1 zestawiono parametry modeli.

Procedurę symulacji wykonano w siatce interpolacyjnej o odległościach węzłów 50 m, czyli o odległości 10 razy mniejszej niż średnia odległość pomiędzy otworami rozpoznawczymi. Wykonano 25 realizacji. Dla porównania wyników wykonano również procedurę krzygu. Na rysunku 4 przedstawiono średnią z symulacji jako efekt postprocessing'u 25 realizacji. Na rysunku 5 przedstawiono model miąższości złoża wykonany metodą krzygu zwyczajnego. Na mapach krzyżkami oznaczono miejsca otworów rozpoznawczych.

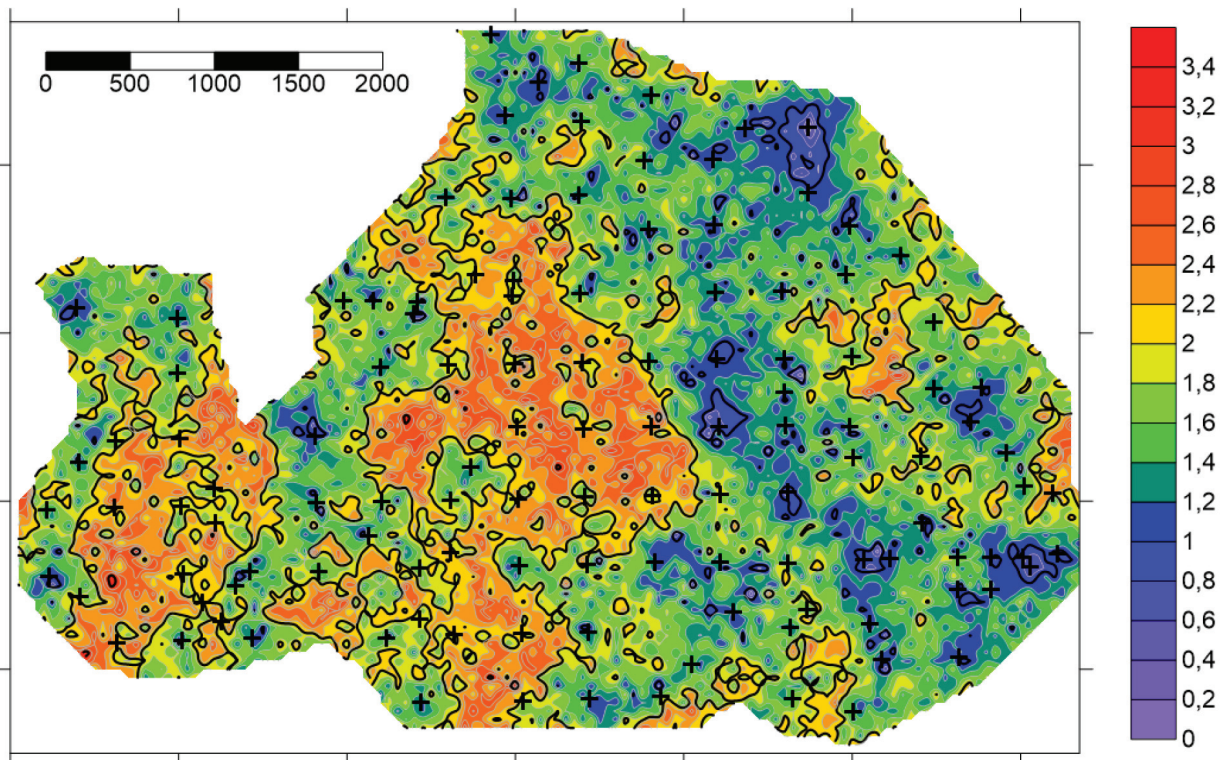
Do wykonania symulacji zastosowano program Isatis firmy

Geovariances [3], a do wizualizacji obliczeń wykorzystano program Surfer 13.

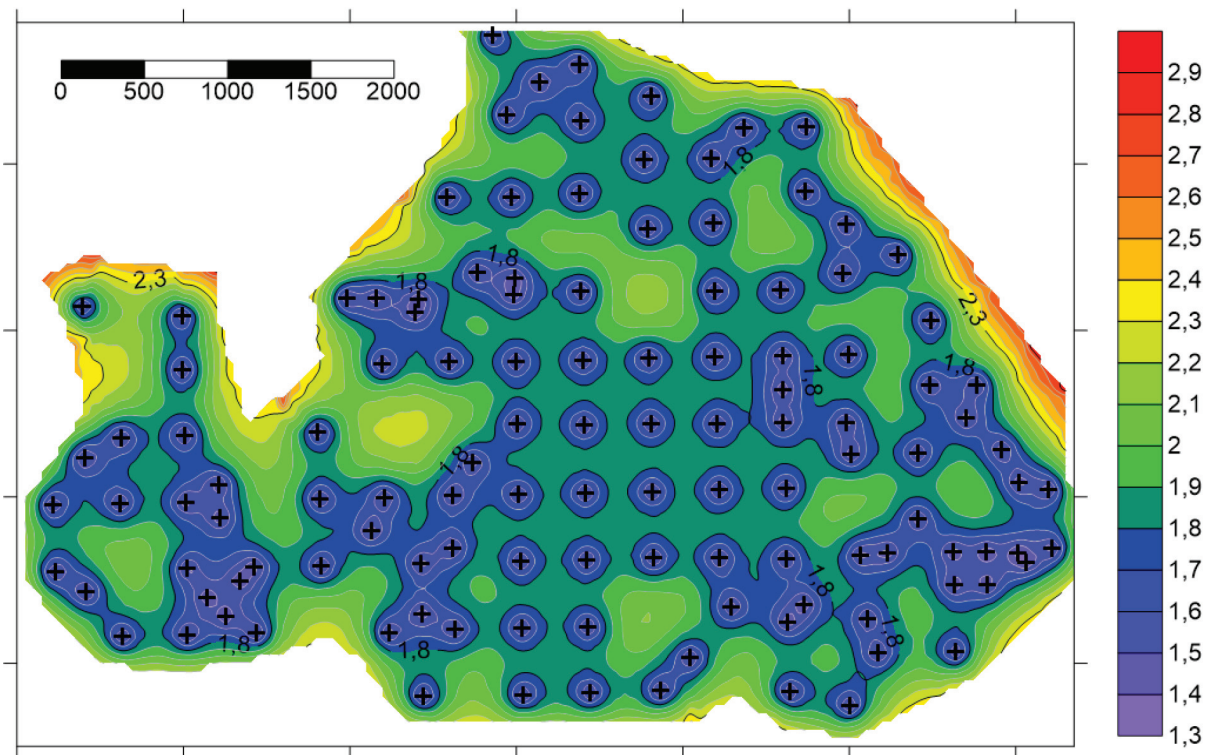
Wykorzystując możliwości metod geostatystycznych wykonano mapy odchylenia standardowego. Rysunek 6 przedstawia odchylenie standardowe obliczone jako efekt postprocessing'u 25 realizacji symulacji geostatystycznej, rysunek 7 przedstawia odchylenie standardowe krzygu czyli teoretyczny błąd modelu.

Dyskusja wyników

Modele wykonane metodą symulacji oraz metodą krzygu (rys. 4 i 5) różnią się między sobą. Na rysunku 4 wyraźnie widoczna jest większa zmienność miąższości złoża i większa



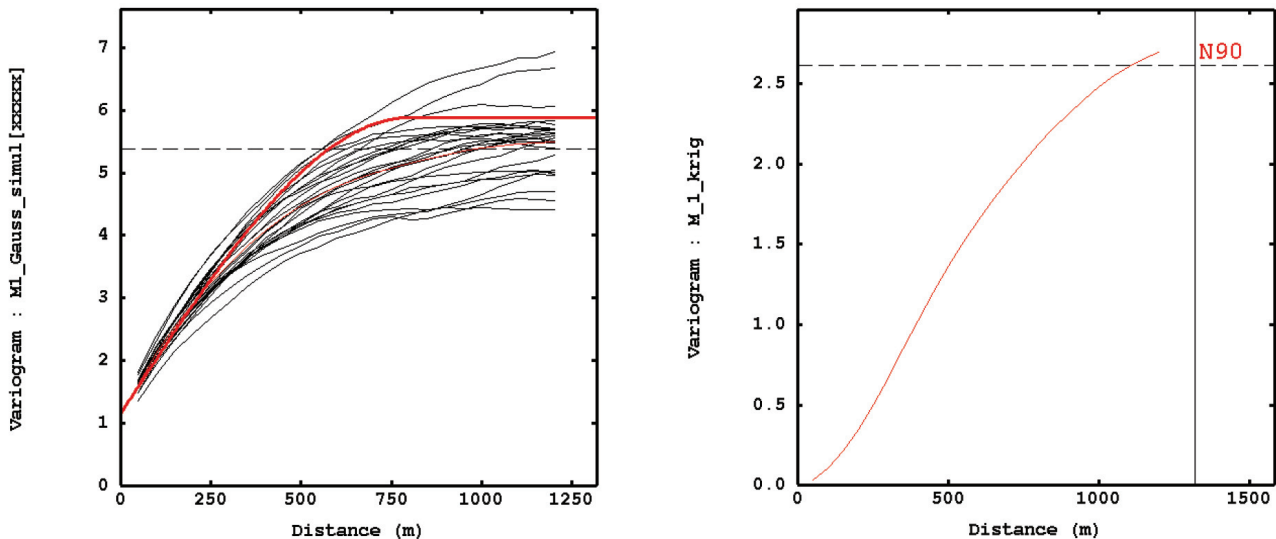
Rys. 6. Odchylenie standardowe symulacji obliczone na podstawie 25 realizacji [m]
 Fig. 6. Standard deviation of the simulation calculated on the 25 realizations [m]



Rys. 7. Odchylenie standardowe krigingu tzw. błąd krigingu [m]
 Fig. 7. Standard deviation of the kriging, so called kriging error [m]

nieregularność izolinii. Zdecydowanie różnią się mapy ilustrujące odchylenie standardowe obydwu metod. Nie tylko pod względem wartości ale przede wszystkim pod względem rozmieszczenia obszarów o wyższych lub niższych wartościach. W przypadku krigingu (rys. 7) widoczna jest zależność wielkości błędu od geometrii sieci otworów rozpoznawczych. Najwyższe wartości błędu wykazane są na obrzeżach modelu miąższości złoża. W przypadku odchylenia standardowego symulacji

wyraźne są dwa obszary gdzie odchylenie standardowe przyjmuje znacznie wyższe wartości. Obszary te nie mają związku z rozmieszczeniem otworów. Wysoka wartość odchylenia standardowego symulacji wykazana jest w tych miejscach, gdzie wartości pomierzonego parametru są mało stabilne czyli znacznie się wzajemnie różnią. W tych obszarach pojedyncze realizacje symulacji różnią się wzajemnie, co odzwierciedla się w wysokich wartościach odchylenia standardowego na mapie



Rys. 8. Wariogramy obliczone na podstawie modeli – 25 realizacji (z lewej) oraz kriginu (z prawej). Gruba czerwona linia na rysunku z lewej przedstawia model wariogramu z rys. 3 (z lewej)

Fig. 8. Variogram calculated on the basis of the models - 25 realisations of simulation (left) and kriging (right). The bold red line in the figure on the left shows the variogram model presented on the figure 3 (left)

(rys. 6). W obszarach złoża, gdzie wartości są do siebie zbliżone poszczególne realizacje symulacji również są do siebie podobne.

Warto zwrócić uwagę, że z rysunku 7 wynikają odmienne a nawet sprzeczne wnioski. Obszary czerwone (wysoka wartość odchylenia standardowego symulacji) wykazane na rysunku 6 generalnie okazują się być rozpoznane regularną siecią otworów i dlatego wartości błędu kriginu w tych miejscach są niskie (rys. 7). Skąd zatem wiadomo, który z modeli jest bardziej wiarygodny czy błąd symulacji czy kriginu? Dla wykazania dlaczego wyniki symulacji są bardziej wiarygodne przeprowadzono dodatkowe obliczenia.

Na podstawie wartości obliczonych dwiema metodami w siatkach interpolacyjnych wykonano wariogramy i porównano je z modelem wariogramu dopasowanego do wariogramu empirycznego obliczonego na podstawie obserwacji oryginalnych (rys. 3). Na rysunku 8 z lewej przedstawiono wiązkę wariogramów z 25 realizacji symulacji, po prawej wariogram z modelu wykonanego metodą kriginu zwyczajnego.

Wariogramy z realizacji (rys. 8, z lewej) pokrywają się z modelem głównie dla par węzłów odległych od 0 do ok. 400 m, wraz ze wzrostem odległości odchylenia zwiększają się. Warto jednak podkreślić dużą wierność struktury poszczególnych realizacji dla małych odległości. W przypadku kriginu wariogram obliczony na podstawie modelu odbiega w każdym sensie od modelu użytego w procedurze kriginu. Jego kształt przypomina model typu Gaussa a nie sferyczny jaki był użyty do modelowania, a wartość wariogramu ($2,5 \text{ m}^2$) osiąga zaledwie 40% wartości modelu oryginalnego ($6,0 \text{ m}^2$). Wartość wariancji lokalnej (*nugget effect*) została zredukowana do zera.

Podsumowanie i wnioski

Na tle metod interpolacyjnych metody geostatystyczne odznaczają się jako te, które najpełniej wykorzystują informację pozyskaną w terenie. Popularna i często wykorzystywana metoda kriginu zwyczajnego, mimo wielu

zalet, ma wady wynikające z tzw. wygładzania modelu, w wyniku czego traci się informacje o wartościach bardzo niskich lub bardzo wysokich. Kompensację tych braków zapewnia symulacja. Sama procedura symulacji w wersji Warunkowej Sekwencyjnej Symulacji Gaussa jest wielostopniowa i nie przebiega automatycznie; wymaga podejmowania decyzji na kolejnych jej etapach. Modelowanie przy pomocy symulacji geostatystycznej jest trudniejsze niż w przypadku innych metod, jednak informacja pozyskana w ten sposób znakomicie rekompensuje poświęcony czas. W przedstawionym studium przypadku pokazano tylko jeden z wielu sposobów wykorzystania symulacji – do identyfikacji deficytów rozpoznania złoża czyli obszarów, w których odchylenie standardowe symulacji przyjmuje znaczne wartości.

Na podstawie mapy odchylenia standardowego symulacji można wyciągnąć następujące wnioski:

- w obszarach złoża, w których wartość odchylenia standardowego przyjmuje znacząco wyższe wartości można zaprojektować wykonanie dodatkowych otworów rozpoznawczych,
- na kolejnych etapach rozpoznania złoża powinno się zwrócić szczególną uwagę na obszary o wysokim odchyleniu standardowym, pozwoli to na optymalne wykorzystanie środków na dokumentowanie złoża,
- mając na uwadze dużą zmienność wartości w obszarach o wysokim odchyleniu standardowym należy świadomie traktować model złoża w tym rejonie jako mniej wiarygodny niż w miejscach gdzie odchylenie przyjmuje wartości niskie. Pomoże to ograniczyć ryzyko związane ze zbyt optymistycznym szacowaniem parametrów złożowych w procesie projektowania inwestycji górniczej.

Literatura

- [1] Akin H., Siemens H. (1988) *Praktische Geostatistik: Eine Einführung für den Bergbau und die Geowissenschaften*. Springer Verlag, Berlin
- [2] Benndorf J. (2009): Evaluation of lignite deposits using conditional simulation in geostatistics. *Schriftenreihe des Institutes für Geotechnik und Markscheidewesen der TU Clausthal*, Ausgabe 18/2009, s. 221
- [3] Bleines C., Perseval S., Rambert F., Renard D., Touffait Y. *Isatis. Isatis software manual*, Geovariances & Ecole Des Mines, Paris, s. 710, 2004
- [4] Chiles C., V., Delfiner P. *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*, New York: John Wiley&Sons, 449-471, 1999
- [5] Cressie N. (1991): *Statistics for Spatial Data*. A Wiley-Interscience Publication. John Wiley & Sons, INC., New York
- [6] Dietrich, C.R., Newsam G., N. A fast and exact method for multidimensional Gaussian stochastic simulations, *Water Resources Research* 29 (8): 2861-2899, 1993
- [7] Isaaks E., Srivastava R. M. (1989): *An Introduction to Applied Geostatistics*, Oxford University Press, New York, 561
- [8] Journel A. C., Huijbregts Ch. J. (1978): *Mining Geostatistics*, Academic Press., London, 600
- [9] Journel A., G. (1974): Geostatistics for conditional simulation of ore bodies, *Economic Geology* 69: 673-687
- [10] Mucha J. (1994): *Metody geostatystyczne w dokumentowaniu złóż*, Katedra Geologii Kopalnianej AGH, Kraków
- [11] Mucha J. (2001): Bariery i ograniczenia geostatystycznej oceny parametrów złożowych. *Zeszyty Naukowe AGH, Geologia* t. 27, z. 2-4, s. 641-658, 2001
- [12] Mucha J., Wasilewska-Błaszczak M. (2011): *Praktyczne doświadczenia geostatystycznego modelowania i dokumentowania polskich złóż – przegląd wybranych zastosowań [w] Geomatyka górnicza, Praktyczne zastosowania – monografia pod red. Artura Dyczko i Artura Krawczyka*. Wyd. Fundacji dla AGH, Kraków
- [13] Nieć M. (2011): *Problemy geologicznego dokumentowania złóż kopalni stałych*, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków
- [14] Nowak M., Verly G (2007): A practical process for geostatistical simulation with emphasis on Gaussian methods, in *Orebody, Modeling and strategic mine planning*, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Spectrum Series, vol. 14, 2nd Edition, s. 69-78



fot. z arch. Kopalni

Kopalnia Suków