

MEANDRY MODELOWANIA ZŁÓŻ – NA PODSTAWIE DOŚWIADCZEŃ I OBSERWACJI

MEANDERS OF DEPOSITS MODELING - BASED ON EXPERIENCE AND OBSERVATION

Wojciech Naworyta - AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii

W artykule przedstawiono subiektywny wybór problemów związanych z procesem modelowania złóż. Omówiono istotę modelowania oraz cechy informacji geologicznej wykorzystywanej w tym procesie. Na podstawie kilku wariogramów empirycznych wskazano znaczenie identyfikacji istnienia autokorelacji parametrów złożowych i jej zasięgu dla tworzenia map izoliniowych. Przedstawiono interpretację wariancji lokalnej i jej wpływ na dokładność modelu wykonanego metodą krigingu. Poddano pod dyskusję sens tworzenia modeli trójwymiarowych dla niektórych rodzajów złóż. Zwrócono uwagę na nadmierne zaufanie użytkowników do programów komputerowych i nieumiejętność właściwego wykorzystania pełnego potencjału nowoczesnych metod modelowania.

Słowa kluczowe: modelowanie złóż, wariogram, autokorelacja, trend, wariancja lokalna, mapy izoliniowe

The article presents a subjective selection of problems associated with the process of modeling the deposits. It discusses the essence of modeling and features of geological information used in this process. Based on several empirical variograms, the significance of identifying the existence of autocorrelation of deposit parameters and the autocorrelation range for the creating of contour maps was indicated. The interpretation of local variance and its impact on the accuracy of the kriging model were presented. The meaning of creating three-dimensional models for some types of deposits was discussed. Attention has been paid to excessive trust in computer programs among users and the inability to properly utilize the full potential of modern modeling methods.

Keywords: modeling of deposits, variogram, autocorrelation, trend, nugget effect, contour maps

Wstęp

Złoże kopaliny jest podstawowym przedmiotem działalności górniczej. Złoża pod ziemią wciąż jeszcze nie potrafimy zobaczyć, nie istnieją techniki, które umożliwiłyby dokładne rozpoznanie struktur geologicznych, granic złoża, właściwości kopaliny. Informacje o złożu ograniczają się do niewielkiej próby pozyskanej na etapie dokumentowania. Na podstawie dyskretnej informacji z otworów rozpoznawczych wykonuje się model, czyli możliwie wyczerpujący opis parametrów złożowych – tych strukturalnych i tych jakościowych. Sztuka modelowania polega na wyciągnięciu maksimum informacji o złożu z ograniczonej próby jaką są dane z otworów rozpoznawczych.

Modelowanie złoża to jeden z kluczowych etapów procesu górniczego. Model wykorzystywany jest na wszystkich etapach działalności wydobywczej. Począwszy od rozpoznania i dokumentowania złoża, przez koncepcje, plany eksploatacji i biznesplany do eksploatacji samej i sterowania jakością surowca w jej trakcie. Złoże wcale nie musi być eksploatowane aby modelowanie miało sens. Na podstawie modelu można oszacować jego wartość i wykorzystać tę wiedzę w obrocie nieruchomości.

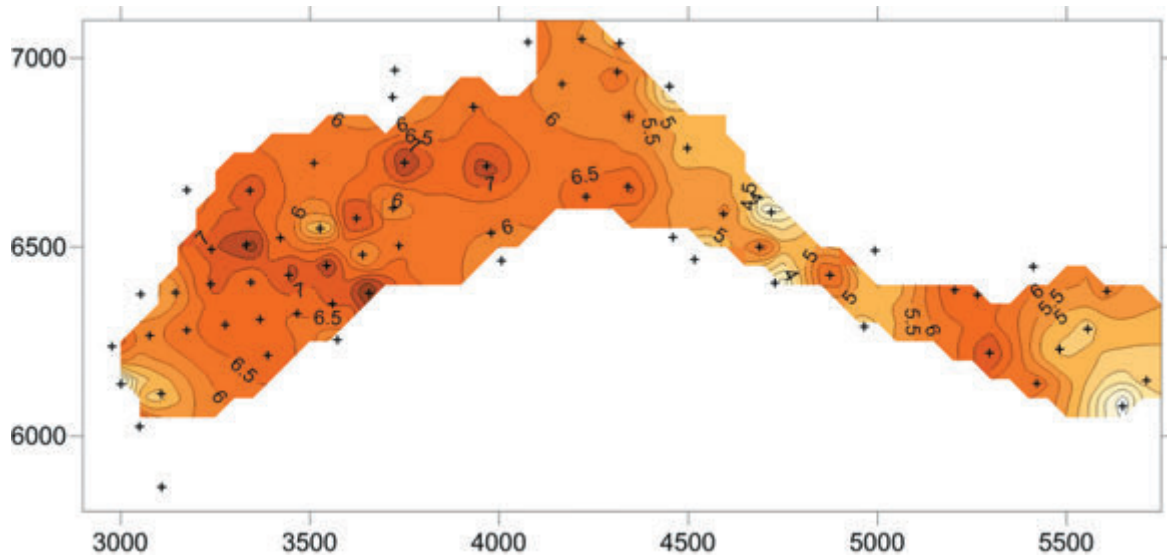
Model złoża źle wykonany stanowi informację niepraw-

dziwą. Błędy modelowania będą się przenosić na kolejne etapy procesu górniczego. Mogą mieć negatywny wpływ na powodzenie górniczego przedsięwzięcia.

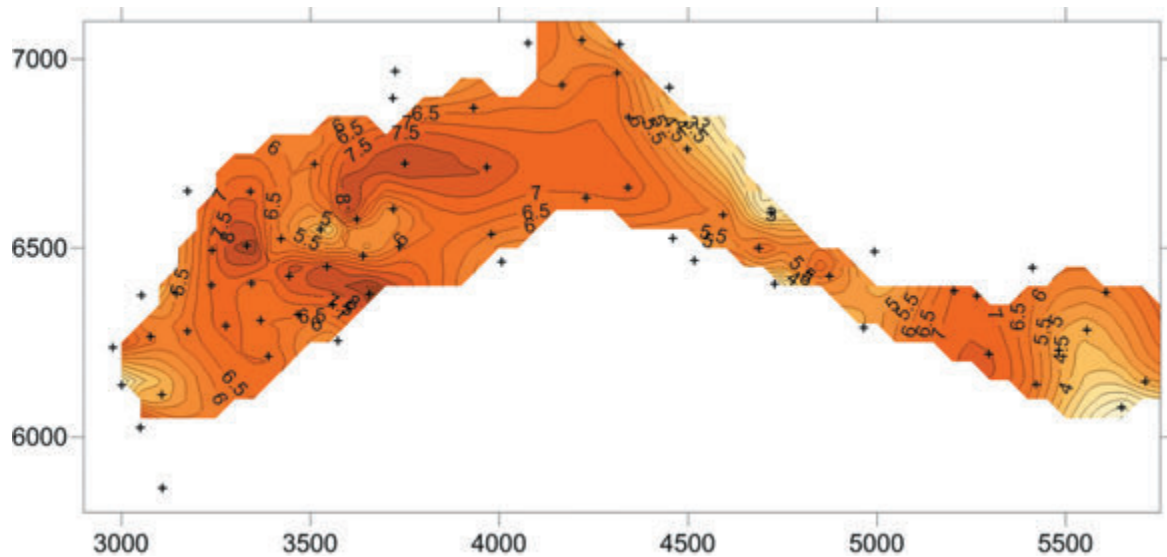
Informacja o złożu jako próba losowa

Model złoża wykonuje się najczęściej na bazie informacji z otworów rozpoznawczych, które odwiercane są na podstawie projektu prac geologicznych. Lokalizacja otworów jest mniej lub bardziej przypadkowa, dlatego dane jakimi geolog dysponuje w procesie modelowania są niczym próba losowa. O tym, jak bardzo niewielka jest to próba, niech świadczą liczby. Na jednym ze złóż węgla brunatnego udokumentowanym w kategorii B+C₁+C₂ odwiercono dużo, bo aż 730 otworów, w których stwierdzono występowanie kopaliny. Przy średniej miąższości pokładu węgla wynoszącej ok. 10 m, rdzeń zawierał ok. 0,13 Mg węgla brunatnego. Łączne zasoby kopaliny w złożu oszacowano na poziomie ok. 1,6 mld Mg. Próba z 730 otworów zawiera łącznie ok. 99 Mg węgla, a to stanowi zaledwie 0,0000062% masy całego złoża.

Gdyby informację o złożu, traktowaną jako próbę losową, porównać do sondażu jakie wykonuje się dla zbadania preferencji społecznych, to porównanie to jest zdecydowanie na wyrost, bowiem próba złożona z 1 tys. osób przepytanych



Rys. 1. Model miąższości pokładu złoża węgla brunatnego wykonany metodą odwrotnej odległości
Fig. 1. Model of the lignite seam thickness, made by the inverse distance method



Rys. 2. Model miąższości pokładu złoża węgla brunatnego wykonany metodą minimum krzywizny
Fig. 2. Model of the lignite seam thickness, made by the minimum curvature method

najczęściej przez ankierów w kraju liczącym ok. 30 mln ludzi dorosłych stanowi aż 0,0026% badanej populacji. Próba ta jest o trzy rzędy wielkości większa niż próba geologiczna, a przecież wiemy jak mało zgodne z rzeczywistością okazują się wyniki sondaży. Powyższe, nie do końca adekwatne porównanie, powinno uświadomić skalę niedoskonałości informacji jaką dysponuje geolog przystępujący do modelowania złoża.

Uwzględniając powyższe oraz biorąc pod uwagę wysokie koszty pozyskania dodatkowej informacji o złożu przez wykonanie większej ilości otworów w terenie, należy dołożyć wszelkich starań, aby w procesie modelowania w sposób optymalny wykorzystać dostępną informację jaka ukryta jest w dokumentacji geologicznej i wykonać model, który będzie najlepszym wyobrażeniem rzeczywistego złoża. To, że model będzie zawierał błędy jest pewne, istotne jest jednak, aby błąd ten był możliwie niewielki, a już nieodzownym jest poznanie rzędu wielkości teoretycznego błędu modelu. Teoretycznego, bo rzeczywisty błąd modelu będzie nam znany dopiero w trakcie eksploatacji złoża.

Moje doświadczenia wskazują, że te pierwsze modele złoża są najczęściej zbyt optymistyczne. Zasoby albo kluczowe parametry są raczej przeszacowane, a błąd oszacowania prze-

kracza często kilkanaście procent. To nawet da się racjonalnie wytłumaczyć, bo przecież nie wszystkie negatywne zjawiska jakie występują w złożu w postaci rozmyć erozyjnych, lejów krasowych, które mają wpływ na zubożenie zasobów, zostały w procesie dokumentowania złoża zidentyfikowane. Do rzadkości należą sytuacje odwrotne, kiedy okazuje się, że zasoby złoża są znacznie bogatsze niż pierwotnie szacowano.

Interpolacja, mapy izoliniowe, ich sens i jakość

Jednym z popularnych sposobów modelowania złoża jest wykonanie mapy izoliniowej przez zastosowanie interpolacji. W programach komputerowych dostępnych jest wiele algorytmów, które na podstawie danych z otworów wyrysują izolinie wewnątrz jak i na zewnątrz obszaru badań. Interpolacja jednak nie zawsze ma sens [2]. Nieświadomy tego operator wykona mapę i traktuje ją jako model. Mapa izoliniowa wykonana na podstawie danych, które nie wykazują nielosowego charakteru zmienności jest informacją wadliwą. Wnioskowanie na jej podstawie prowadzi na manowce. To wciąż jeszcze często się zdarza, bo analiza zmienności parametrów złożowych pod kątem występowania autokorelacji nie jest stosowana powszechnie.

Problem nadmiernej wiary w programy komputerowe będzie dalej przedmiotem osobnego omówienia. Wracając do metod interpolacji, mapy parametrów złoża wykonane różnymi metodami będą się pomiędzy sobą różnić, czasem znacznie. Skąd mamy wiedzieć, która metoda pozwala uzyskać lepszy model? Nie mamy takiej wiedzy. Co najwyżej okiem fachowca, który niejedno złożo już widział, możemy zaryzykować stwierdzenie, że złożo w naturze tak nie wygląda. Faktycznie, niektóre metody dostarczają dość sztucznych i nieprawdopodobnych obrazów. Celuje wśród nich metoda odwrotnej odległości (rys. 1). Owalne figury pojawiają się głównie wokół lokalizacji otworów rozpoznawczych. Jest to widoczna wada metody, trudno bowiem przypuszczać, że otwory zostały odwiercone dokładnie w środku dziwnych owali. Mapa wykonana metodą minimum krzywizny przedstawia odmienny obraz tego samego złoża (rys. 2). Wydaje się, że jest on bliższy geologicznej naturze. Niestety, trudno jednoznacznie wskazać, który z tych modeli lepiej odzwierciedla prawdziwe złożo. Porównanie modeli wykonanych różnymi metodami przedstawiono w pracy Muchy i Wasilewskiej [5].

Wariogram – narzędzie przydatne nie tylko w procedurze krigingu

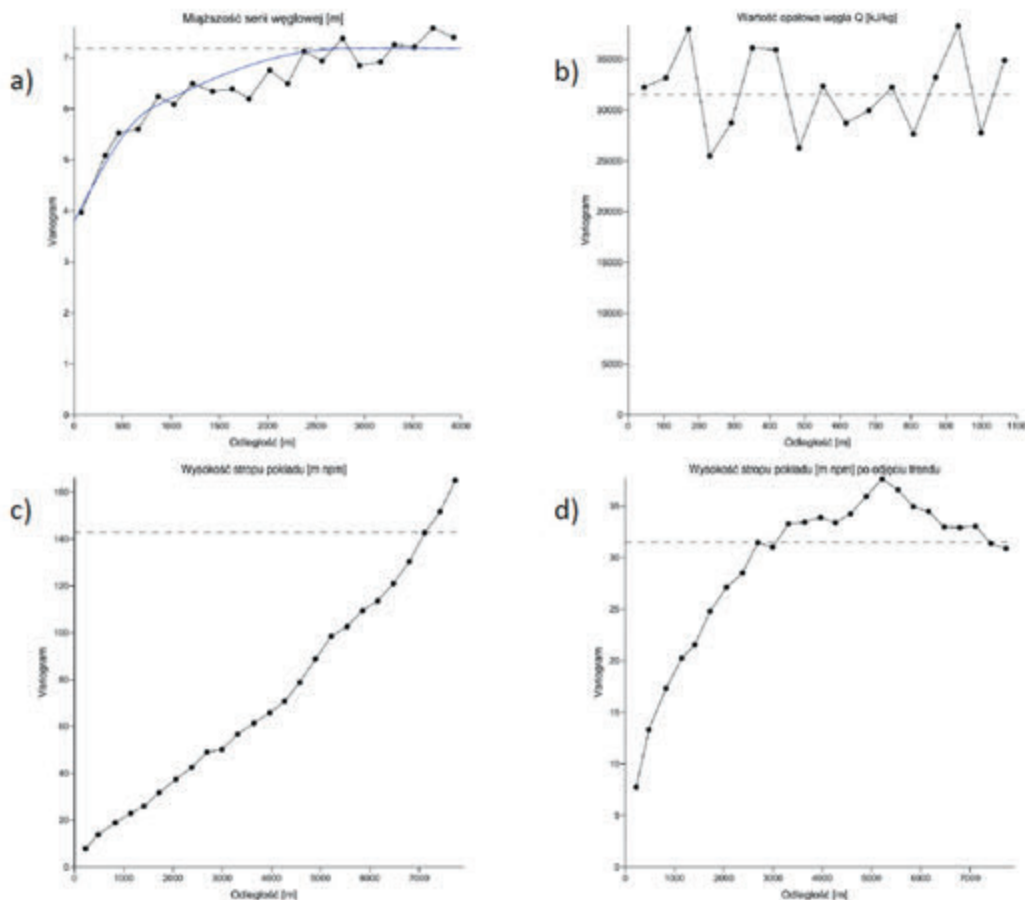
Modelowanie złoża należy rozpocząć od prostych ale niezwykle istotnych czynności – przygotowania danych i analiz statystycznych przy użyciu zwykłego arkusza kalkulacyjnego. Pierwsza czynność – inspekcja danych, powinna być wykonana

z niezwykłą starannością. Jest to czynność nudna, niechętnie się ją robi, bo chciałoby się od razu spojrzeć na wyniki, wykresy i modele. Niestety, jej zaniechanie może prowadzić do błędów na późniejszych etapach modelowania i efektywne mapy, będące wynikiem kilku dni pracy, można wyrzucić do kosza.

Warto wykonać histogram albo wykres skrzynkowy, który umożliwi rozpoznanie gęstości rozkładu oraz pomoże zidentyfikować wartości ekstremalne. Te ostatnie, o ile znajdują się w zbiorze obserwacji, mogą być wynikiem błędów. Ich eliminacja, o ile uprawniona, znacznie uprości dalsze czynności związane z modelowaniem. Dla przykładu - jeśli w zbiorze obserwacji parametru zawartości siarki w węglu znajdzie się liczba 20% to możemy być pewni, że jest ona wynikiem braku przecinka. Taka ilość siarki w węglu wskazuje raczej na złożo siarki niż złożo węgla. Sytuacja jest więc jednoznaczna. Takie przypadki wcale nie należą do rzadkości, zwłaszcza gdy operujemy na dokumentacjach starszych.

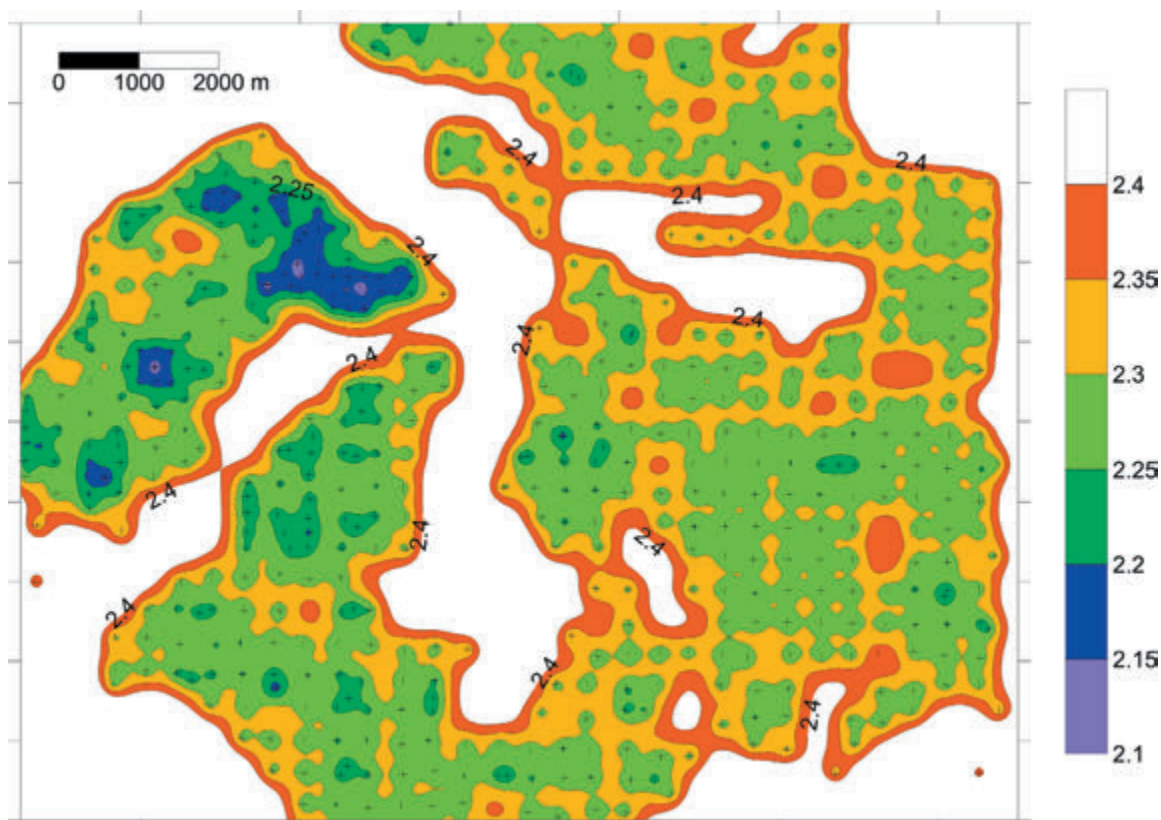
Nie do przecenienia jest analiza danych wykonana metodą wariogramu. Podstawowe narzędzie geostatystyczne dostarcza wielu informacji o zmienności parametru złożowego: o istnieniu autokorelacji i jej zasięgu, o istnieniu trendu, o ewentualnej anizotropii czy wreszcie o granicy dokładności modelu wykonanego metodą krigingu.

Na rysunku 3 pokazano cztery różne wariogramy, na podstawie których można zidentyfikować pewne charakterystyczne cechy parametrów złożowych. Pierwszy (rys. 3a) wskazuje na wyraźne istnienie nielosowego pierwiastka w zmienności analizowanej miąższości pokładu węgla.



Rys. 3. Przykładowe wariogramy parametrów złożowych a) miąższość serii węglowej złoża węgla brunatnego b) wartość opałowa węgla brunatnego, c) rzędne stropu pokładu węgla brunatnego z występowaniem trendu, d) rzędne stropu pokładu węgla brunatnego po odjęciu trendu liniowego

Fig. 3. Exemplary variograms of the deposit parameters a) thickness of the lignite deposit, b) calorific value of lignite, c) elevation of the lignite seam roof with the occurrence of the trend, d) elevation of the lignite seam roof after subtraction of the linear trend



Rys. 4. Mapa teoretycznego błędu modelu miąższości serii węglowej wykonana metodą kriginu z wykorzystaniem modelu wariogramu z rys. 3a. Krzyżykami pokazano położenie otworów rozpoznawczych

Fig. 4. A map of the theoretical error of the lignite deposit thickness model, made by kriging using the variogram model of Fig. 3a. Crosses show the location of the boreholes

Spory, bo na poziomie $3,8 \text{ m}^2$, jest udział wariancji lokalnej. Wariancja lokalna albo efekt samorodków (nugget effect), która nie jest mierzona, a wynika z przedłużenia modelu wariogramu w kierunku osi pionowej jest wielkością, która dostarcza wielu informacji o charakterze zmienności parametru. Między innymi jej wartość wyznacza dolną granicę błędu oszacowania wartości średniej metodą kriginu. Model złoża wykonany z wykorzystaniem wariogramu z rysunku 3a będzie cechował się wariancją oszacowania nie mniejszą niż $3,8 \text{ m}^2$, co przekłada się na odchylenie standardowe, albo też błąd kriginu, na poziomie większym niż $1,95 \text{ m}$. To kluczowa informacja dla właściwej interpretacji modelu. Mapę odchylenia standardowego (błędu kriginu) pokazano na rysunku 4. Tylko w lewym górnym rogu, gdzie sieć otworów ma największą gęstość, teoretyczny błąd modelu zawiera się w granicach $2,1\text{-}2,15 \text{ m}$. Poza tym obszarem błąd modelu przybiera wartości wyższe dochodzące do $2,4 \text{ m}$.

Z kształtu wariogramu (rys. 3a) można odczytać zasięg autokorelacji na poziomie $2,5 \text{ km}$. Jest to odległość, dla której wariogram zmienia swój przebieg zbliżając się do przerywanej linii, która wyznacza poziom wariancji wszystkich obserwacji. Pomiędzy obserwacjami, odległymi od siebie nie bardziej niż zasięg autokorelacji, można wykonać interpolację, bowiem do tej granicznej odległości obserwacje są, statystycznie rzecz biorąc, wzajemnie skorelowane. Obserwacje położone w odległości większej niż zasięg autokorelacji są w stosunku do siebie niezależne, nie są skorelowane. Interpolacja parametru pomiędzy takimi obserwacjami jest nieuprawniona.

Wariogram na rysunku 3b obrazuje strukturę zmienności wartości opałowej Q [kJ/kg] na jednym ze złóż węgla brunatnego. Wartości wariogramu oscylują wokół przerywanej linii wariancji. Taki kształt wariogramu empirycznego wskazuje na

brak pierwiastka nielosowego w zmienności parametru złoża. To wyklucza sens wykonywania map izoliniowych. Dla obserwacji wykazujących brak autokorelacji wystarczająco dobrym modelem jest histogram i klasyczny opis statystyczny.

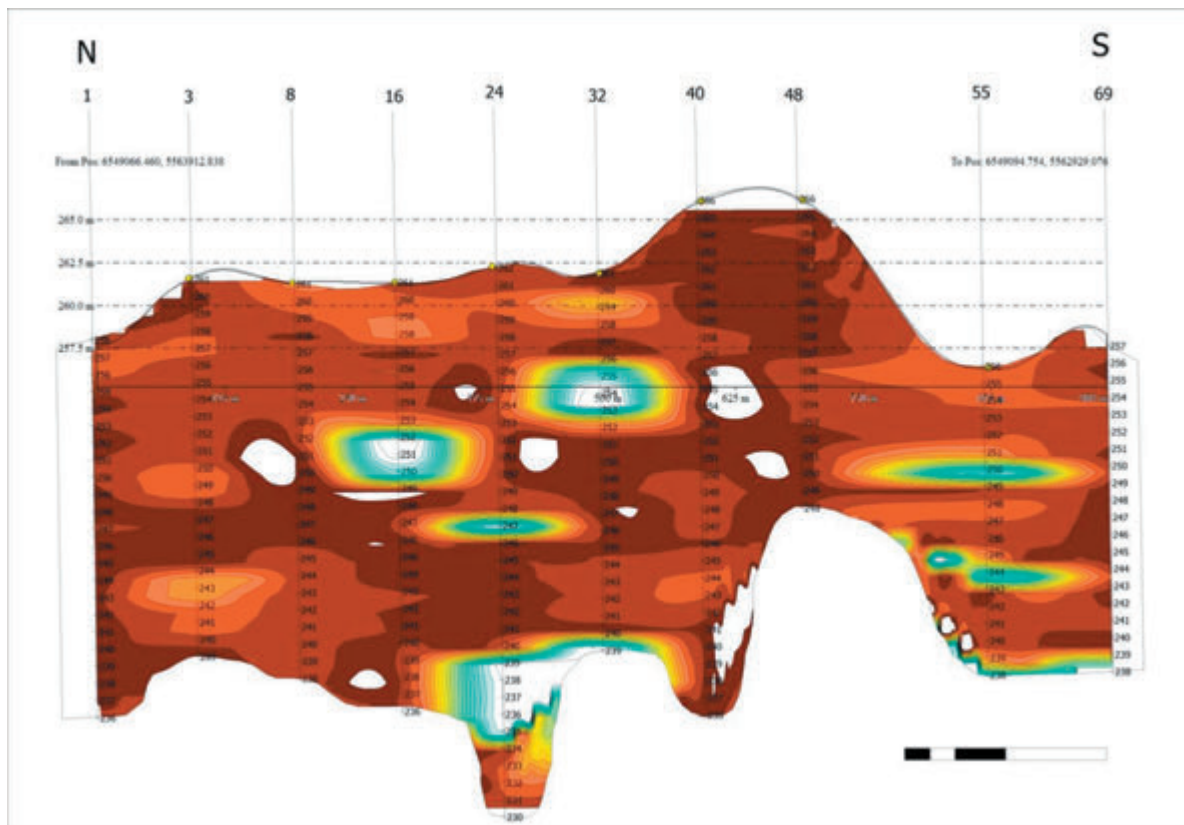
Wartości wariogramu na rysunku 3c rosną systematycznie wraz z odległością. Takie zachowanie wskazuje na istnienie trendu w strukturze zmienności parametru. W tym konkretnym przypadku chodzi o rzędne stropu pokładu, który zapada w jednym kierunku. Przed próbą modelowania konieczne jest odjęcie od wartości parametrów wielkości wynikającej z trendu. Zrobi to za nas komputer ale my powinniśmy wiedzieć, że ta operacja jest konieczna. Po odjęciu trendu wariogram wygląda zupełnie inaczej (rys. 3d). Nie tylko zmienił się jego kształt, wskazując na granicę autokorelacji przy odległości ok. $2,8 \text{ km}$, ale też znacznie zmniejszyła się wartość wariancji z ponad 140 m^2 (rys. 3c) do ok. 32 m^2 (rys. 3d).

Analiza zmienności kierunkowej była przedmiotem wielu publikacji, dlatego pozwolę sobie wyłącznie wskazać źródła [1, 3, 4], to właśnie wariogram jest tym narzędziem, które umożliwia identyfikację anizotropii i spożytkowanie tej wiedzy w procesie modelowania.

Wariogram, sam w sobie, jest cennym narzędziem analitycznym, za pomocą którego można poznać charakter zmienności parametrów złoża. Nie można go zatem traktować wyłącznie jako narzędzie w procedurze kriginu.

Modelowanie 3D i rzadki przypadek nadmiaru informacji o złożu

Modelowanie 3D jest efektowne. Kolorowe bryły oglądane z różnych stron wyglądają imponująco. Czy jednak modelowanie trójwymiarowe zawsze ma sens? Nie, według mnie nie i nie



Rys. 5. Przekrój przez złożę antropogeniczne – model mało wiarygodny i trudny w interpretacji (Naworyta 2015)

Fig. 5. Cross-section through the anthropogenic deposit - a model that is unreliable and difficult to interpret (Naworyta 2015)

zawsze jest możliwe. Jest uprawnione wtedy, gdy informacja o pionowej zmienności parametru złożowego jest równie rzetelna jak w pozostałych horyzontalnych wymiarach. W przypadku złóż pokładowych o niewielkiej zmienności miąższości pokładu takich jak większość polskich złóż węgla brunatnego modele trójwymiarowe nie mają praktycznego sensu. W otworach rozpoznawczych oznacza się parametry złoża w dwóch, maksymalnie trzech pionowych odcinkach rdzenia. To za mało aby wykonywać rzetelne i wiarygodne modele trójwymiarowe. Tym bardziej, że większość złóż pokładowych węgla brunatnego eksploatuje się w sposób, który już na etapie urabiania prowadzi do pionowej homogenizacji urobku. Zamiast efektywnych, ale mało informatywnych map trójwymiarowych wystarczy wykonać mapy izoliniowe obrazujące zmienność uśrednionego parametru złożowego dla całej grubości pokładu.

Nieco inny problem ilustruje kolejny przykład. Na złożu antropogenicznym (składowisku) odwiercono regularną sieć otworów i bardzo dokładnie oznaczono parametry materiału na wielu odcinkach rdzenia. Taki materiał pomiarowy wykorzystano w programie, który wyprodukował model i kolorowe przekroje (rys. 5). Ze względu na dużą zmienność pionową obrazy wyprodukowane przez program były po pierwsze mało wiarygodne, po drugie trudne w interpretacji. Owalne figury widoczne na przekroju zostały wykreślone przez program na podstawie informacji wyłącznie z pojedynczych otworów. Na pierwszy rzut oka widać, że formy pokazane na przekroju są sztuczne. Wystąpił tu rzadki przypadek nadmiaru informacji. Interpretacja zmienności parametrów takiego złoża wymagała syntezy. Uśrednienie wartości parametrów w otworach umożliwiło zaobserwowanie pewnych prawidłowości. Co więcej, w przypadku jednego z parametrów zaobserwowano nawet występowanie wyraźnej autokorelacji, co umożliwiło wykonanie map izoliniowych. Uśrednienie parametrów złoża w otworach

było uprawnione, bo eksploatacja tego składowiska wiązałaby się z pionową homogenizacją materiału [6].

Przywołany przypadek pokazuje, że w modelowaniu nie zawsze nadmiar informacji jest korzystny. To jednak jest przykład odosobniony, najczęściej występuje problem odwrotny – informacji zwykle jest za mało, co omówiono już na początku artykułu.

Problem nadmiaru zaufania dla narzędzia jakim jest komputer

Zjawisko to występuje nie tylko wśród studentów. Wydawać by się mogło, że etap zafascynowania komputerami mamy już za sobą, tymczasem codzienna praktyka wskazuje, że wynik dostarczony przez maszynę liczącą traktowany jest jak prawda objawiona. Niestety maszyna licząca to tylko maszyna. Specjalistyczne programy nie są intuicyjne w obsłudze i w procesie modelowania często wymagają świadomej interakcji ze strony operatora. Zdanie się na działanie predefiniowanych funkcji w dziedzinie takiej jak modelowanie złóż prowadzi do nikąd. Przykład – interpolacja metodą kriginu. W większości programów można ją wykonać nawet bez analizy i modelowania wariogramu. Program zastosuje model liniowy i otrzymamy wynik. Tylko po co stosować kriging, jeśli nie wykorzystuje się większości jego zalet.

Na pewnej konferencji z zainteresowaniem przysłuchiwałem się relacji o bardzo wyrafinowanym programie komputerowym przydatnym do harmonogramowania produkcji, w którym jednym z elementów było przygotowanie modelu złoża. Wyniki interpolacji materiału pomiarowego były podstawą do dalszych obliczeń. O ile o nowych funkcjach programu referujący mówił w sposób przekonujący, to jednak w odniesieniu do modelowania stwierdził krótko, że zwykle

stosuje kriging liniowy (?). Zapewne chodziło o liniowy model wariogramu wykorzystywany w krigingu. Prawdopodobnie, tak jak to bywa w wielu programach geostatystycznych, domyślnym modelem wariogramu był wariogram liniowy o stałym nachyleniu 45 stopni. Jest on wykorzystywany przez program wtedy, gdy operator zdecyduje się na kriging nie znając istoty tej metody. Jest to pewien bezpiecznik w programie, który umożliwia wykorzystanie procedury, jest to jednak rozwiązanie kompromisowe. Jeżeli operator programu nie pochyla się nad wariogramem eksperymentalnym i nie wykonuje świadomie modelu wariogramu to znaczy, że nie wykorzystuje pełnego potencjału skomplikowanego software'u i już na wstępie popełnia błąd, którego skutki będą rzutować na dalsze etapy procesu, dla którego program został stworzony. Takie postępowanie można przyrównać do jazdy luksusowym Lamborghini zaprzężonym w parę koni.

Podsumowanie

Istotą modelowania złóż jest optymalne wykorzystanie dostępnej informacji. Informacja jest bardzo ograniczona, często jest wadliwa, sieć otworów rozpoznawczych jest nieregularna, nie wszędzie oznaczono interesujący parametr złoża. Jest to jednak jedyna informacja jaka jest do dyspozycji. Do modelowania służą metody matematyczne i programy komputerowe, bez których rozwiązywanie setek równań macierzowych trudno sobie wyobrazić. Efektem obliczeń są mapy i przekroje, obliczenia objętości, oszacowanie zasobów. Mimo specjalistycznych narzędzi komputerowych w procesie modelowania niezbędna jest podstawowa wiedza oraz doświadczenie. Bez nich nawet najlepszy komputer nie uchroni nas przed popełnieniem błędów, które mogą przełożyć się na efekt ekonomiczny bądź nawet na niepowodzenie górniczego biznesu.

Literatura

- [1] Bartuś T., *Anizotropia zmienności głównych parametrów jakości węgla brunatnego w polu Belchatów*, Gospodarka Surowcami Mineralnymi, T. 28, z. 2, 2012
- [2] Dolik M., Kokesz Z., Nieć M., – Sens i bezsens map izolinii. Mat. Sem. „*Metodyka rozpoznawania i dokumentowania złóż kopalin stałych*”, Bierutowice, 8-10 czerwca 1988, Wyd. AGH, Kraków
- [3] Kaczmarczyk M., Nieckula M., Mucha J., Wasilewska-Błaszczuk M., – *Praktyczne konsekwencje geostatystycznego badania struktury zmienności parametrów złoża brunatnego Gubin i siarki Osiek*, Zesz. Nauk. IGSMiE PAN, nr 83, 2012
- [4] Kokesz Z., *Anizotropia i niejednorodność złóż w świetle badań geostatystycznych*, Zesz. Nauk. IGSMiE PAN, nr 85, 2013
- [5] Mucha J., Wasilewska M., *Dokładność interpolacji zawartości siarki i popiołu w wybranych pokładach węgla kamiennego GZW*, Gospodarka Surowcami Mineralnymi, T. 21, z. 1, 2005
- [6] Naworyta W., *Zastosowanie symulacji geostatystycznej w procesie analizy złoża pod kątem jego eksploatacji – przypadek*