

## ZASTOSOWANIE SYMULACJI GEOSTATYSTYCZNEJ W PROCESIE ANALIZY ZŁOŻA POD KĄTEM JEGO EKSPLOATACJI – PRZYPADEK ZŁOŻA ANTROPOGENICZNEGO

### APPLICATION OF GEOSTATISTICAL SIMULATION IN THE PROCESS OF DEPOSITS ANALYSIS FOR ITS OPERATION - THE CASE OF ANTHROPOGENIC DEPOSIT

Wojciech Naworyta - AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

*Na podstawie wyników wierceń wykonanych na jednym ze składowisk odpadów pogórnich przeprowadzono analizy parametrów ilościowych i jakościowych składnika użytecznego (węgla) zawartego w odpadach. W strukturze zmienności większości parametrów analizowanej metodą wariogramów, zgodnie z oczekiwaniem autora, przeważa składnik losowy. Stwierdzona autokorelacja wykazuje bardzo niewielki zasięg nie wykraczający poza średnią odległość pomiędzy otworami wiertniczymi. W zmienności zawartości węgla w odpadach stwierdzono znaczący udział składnika nielosowego. W artykule przedstawiono próbę uzasadnienia tego zjawiska. Na bazie wyników pomiarów wykonano modele zmienności zawartości węgla w odpadach metodą geostatystycznej symulacji warunkowej Gaussa w odmianie blokowej. W artykule opisano poszczególne etapy tego procesu. Do interpretacji wyników 25 realizacji złoża zaproponowano zastosowanie mapy średniej z symulacji, odchylenia standardowego, mapę realizacji minimalistycznej i maksymalistycznej oraz mapę prawdopodobieństwa przekroczenia krytycznej wartości progowej analizowanego parametru. Porównano mapy średniej i prawdopodobieństwa oraz zaproponowano sposób ich interpretacji pod kątem oceny zasadności eksploatacji złoża antropogenicznego.*

**Słowa kluczowe:** złoża antropogeniczne, symulacja warunkowa, geostatystyka, odpady pogórnice

*Based on the results of drilling carried out on one of mining waste deposit the analyze of quantitative and qualitative parameters of useful component contained in the waste has been carried out. The variability structure of most parameters analyzed using variogram, as expected, is random. Reported autocorrelation has a very short range not beyond the average distance between boreholes. The variability of the content of the carbon in the wastes is showing a significant not random component. An attempt to justify this phenomenon has been presented in the paper. On the basis of measurements the models of variation of the carbon content has been performed. For this purpose the geostatistical conditional Gaussian simulation in block variant has been used. The article describes the various stages of this process. To interpret the results of 25 realizations the simulation postprocessing has been proposed. The useful maps has been presented, in particular: mean of 25 realizations, map of standard deviation of 25 realizations, the map of minimum and maximum realizations, and the cutoff map giving the probability that analyzed parameter exceeds critical threshold. The map of mean and the cutoff maps has been compared. The method of interpretation of maps for assessment the merits of the anthropogenic deposit exploitation has been proposed.*

**Keywords:** anthropogenic deposit, conditional simulation, geostatistics, post-mining waste

#### Wstęp

Eksploatacja złóż antropogenicznych wymaga dysponowania informacjami o rodzaju i jakości surowca mineralnego, sposobie jego rozmieszczenia w składowisku oraz o ilości (zasobach) surowca. Wymienione informacje powinny być zawarte w dokumentacji budowanego złoża antropogenicznego. Zasady i sposób sporządzania takiej dokumentacji zostały opracowane w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie na podstawie obowiązujących wcześniej przepisów Rozporządzenia Ministra Ochrony Środowiska Zasobów Naturalnych i Leśnictwa [8].

Według opracowanych zasad sporządzono dokumentację dwóch złóż antropogenicznych wapienia, które zostały zatwierdzone i wpisane do Bilansu zasobów kopalni [11]. Powyższy sposób dokumentowania jest zasadny, gdy już na etapie budowy składowiska traktuje się je jako potencjalne złożo wtórne. W takim przypadku już w procesie składowania można sukcesywnie i w sposób relatywnie dokładny udokumentować ilość i jakość materiału zmagazynowanego na składowisku. Inaczej jest gdy po długotrwałym składowaniu odpadów pogórnich inwestor dochodzi do wniosku, że eksploatacja pozostałego w odpadach składnika użytecznego może być ekonomicznie

uzasadniona. W takim przypadku pozyskanie koniecznych informacji o składowisku (złożu antropogenicznym) powinno być przedmiotem prac geologicznych tak jak to się wykonuje na złożach naturalnych. W publikacji przedstawiono jeden z etapów dokumentowania złoża antropogenicznego polegającego na interpretacji wyników prac rozpoznawczych pod kątem stwierdzenia możliwości eksploatacji składnika użytecznego zawartego w odpadach.

### Idea przewodnia

Informacja z otworów rozpoznawczych jest informacją dyskretną. Na jej podstawie wykonuje się opis statystyczny, mapy, przekroje. Do wykonywania map stosowane są różne metody interpolacyjne, wśród których, ze względu na wiele zalet preferowane są metody geostatystyczne. Stosowanie metod geostatystycznych nie zawsze jednak ma sens. Ograniczenie wynika z warunku stacjonarności przyrostów wartości parametrów złożowych, co w złożach naturalnych najczęściej jest spełnione a w złożach antropogenicznych niekoniecznie. To, czy warunek stacjonarności przyrostów jest spełniony czy nie, uwidacznia się w kształcie wariogramu empirycznego. W zmienności parametrów złóż kopalni najczęściej ujawnia się autokorelacja – czyli podobieństwo cech złożowych. Podobieństwo jest duże dla obserwacji położonych w niewielkiej odległości od siebie i spada wraz ze wzrostem dystansu. Od pewnej granicznej odległości podobieństwo to zanika i można powiedzieć, że obserwowane wartości parametrów są w stosunku do siebie niezależne, nie wykazują wzajemnej korelacji. Autokorelacja wynika z warunków tworzenia się złoża, które w określonym zakresie przestrzennym w czasach jego genezy zapewne były bardzo do siebie zbliżone. Istnienie, bądź brak autokorelacji, bada się przy pomocy wariogramu empirycznego obliczonego na podstawie obserwacji złoża np. w otworach rozpoznawczych. Generalnie jeżeli wartości wariogramu rosną wraz ze wzrostem odległości pomiędzy parami obserwacji to znaczy, że w zmienności parametru istnieje pewien pierwiastek nielosowy. Jeżeli jednak niezależnie od odległości wartości wariogramu oscylują wokół osi poziomej wyznaczonej przez wartość wariancji wszystkich obserwacji to znaczy, że zmienność parametru ma charakter losowy, nie obserwuje się autokorelacji. Często zdarza się, że brak autokorelacji w analizowanych parametrach złoża wynika nie tyle z rzeczywistego charakteru zjawiska ale z niewystarczającej ilości prób, albo ze zbyt dużej odległości między próbami, która to odległość jest większa niż rzeczywisty zasięg autokorelacji. W takich przypadkach należałoby wykonać dodatkowe obserwacje w zagęszczonej sieci otworów. Niezależnie od tego czy brak wyraźnej autokorelacji w kształcie wariogramu empirycznego jest skutkiem losowego charakteru zmienności parametru złoża czy też wynika z niedoskonałości materiału pomiarowego – w obydwu przypadkach nie ma powodu aby do analiz i modelowania takiego materiału stosować metody geostatystyczne.

Wobec wymienionych wyżej warunków zasadne jest pytanie czy do analiz złóż antropogenicznych można stosować metody geostatystyczne tak jak do analiz parametrów złóż naturalnych? Intuicja podpowiada, że raczej nie. Złoża antropogeniczne powstają przecież w wyniku składowania kopaliny albo materiału traktowanego jako odpad. Składowanie to nie proces geologiczny. Można więc oczekiwać, że w zależności od technologii składowania, parametry utworów będą się układały w rodzaj mozaiki, a więc w sposób losowy. Z drugiej jednak strony cechy materiału na

składowisku też podlegają pewnym regułom. Materiał odpadowy pochodzi z naturalnego złoża więc i sekwencja jego składowania może odpowiadać cechom złoża naturalnego.

W niniejszym artykule, na przykładzie jednego ze składowisk odpadów z przeróbki węgla kamiennego, przedstawiono analizy zmierzające do odpowiedzi na postawione wyżej pytanie. Przebadano parametry jakościowe składowiska, na podstawie których można przesądzić o zasadności eksploatacji odpadów i odzysku pozostałości węglowej. Wykonano analizy parametrów jakościowych, w tym zawartości węgla w odpadach, wartości opałowej węgla, popielności węgla, zawartości siarki w węglu. Ponieważ decyzja o podjęciu eksploatacji i odzysku węgla ze składowiska zależy przede wszystkim od udziału składnika użytecznego czyli węgla w odpadach dlatego wykonano kilka przykładowych analiz zmienności tego parametru. Do modelowania złoża wykorzystano metodę symulacji geostatystycznej. Uzasadniono zastosowanie tej metody i zaproponowano sposób interpretacji wyników.

### Materiał badawczy

Obiekt, na którym przeprowadzono analizy to składowisko odpadów pochodzących z przeróbki wydobytego materiału ze śląskich kopalni węgla kamiennego. Materiał wykazuje sporą domieszkę węgla – dochodzącą miejscami nawet do 13%, średnio na poziomie ok. 7%. Odpady nie są jednorodne, pochodzą z kilku kopalni, składowane były w okresie kilku dekad. Materiał pomiarowy wykorzystany do analiz to ok. 60 otworów, jakie odwiercono w niemal regularnej siatce w odstępach ok. 100 m. W każdym z otworów wykonano oznaczenia parametrów tj. zawartość węgla w odpadach  $G$  [%], wartość opałową pozostałości węglowej  $Q$  [MJ/kg], popielność węgla  $A$  [%], zawartość siarki w węglu  $S$  [%]. Oznaczenia wykonano w odstępach 1 metra na całej długości każdego rdzenia. Ze względu na podstawowy cel pracy jakim jest rozpoznanie ilości i jakości węgla w odpadach pod kątem stwierdzenia ewentualnej celowości jego odzysku składowisko będzie dalej nazywane złożem antropogenicznym. Pojęcie złoża antropogenicznego, potrzeba tworzenia takich złóż oraz problemy ich dokumentowania i zagospodarowania były przedmiotem wielu publikacji, dlatego w tym miejscu odstąpiono od przytaczania definicji [6, 7, 9, 10]. Materiał pomiarowy, na bazie którego zilustrowano zagadnienie był wykorzystywany w opracowaniu o charakterze komercyjnym. W artykule celowo nie przedstawiono szczegółowych informacji ani statystyk, nie było to potrzebne dla zobrazowania problemu.

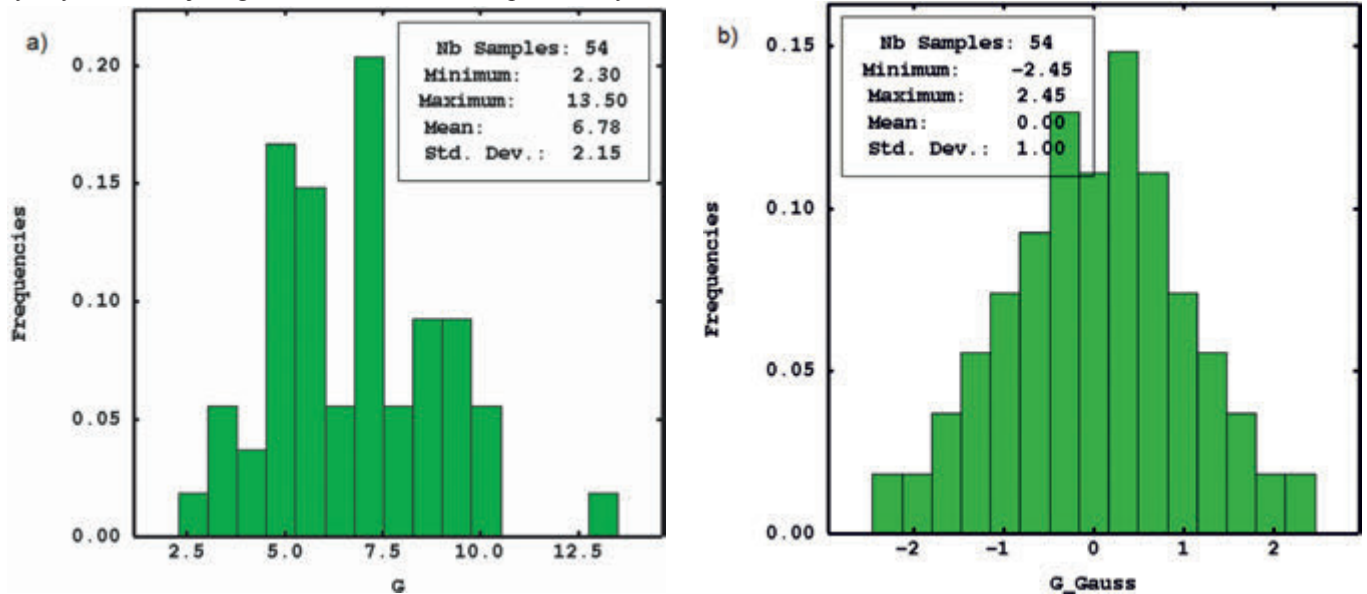
### Opis metody

Materiał badawczy wstępnie analizowano metodą wariogramów w celu rozpoznania charakteru zmienności parametrów złoża. Głównym celem tych badań było wykazanie istnienia albo braku autokorelacji w strukturze zmienności parametrów. Do dokładnej analizy i modelowania zmienności zawartości węgla  $G$  [%] w odpadach zastosowano warunkową symulację geostatystyczną. Było to uzasadnione, bo w strukturze zmienności tego parametru stwierdzono wyraźny pierwiastek nielosowy. Ponieważ długotrwały proces zwałowania materiału pochodzącego z kilku źródeł ma w samej swojej naturze charakter losowy dlatego do modelowania złoża zamiast interpolacji metodą krigingu zastosowano symulację geostatystyczną. Ta metoda pozwala

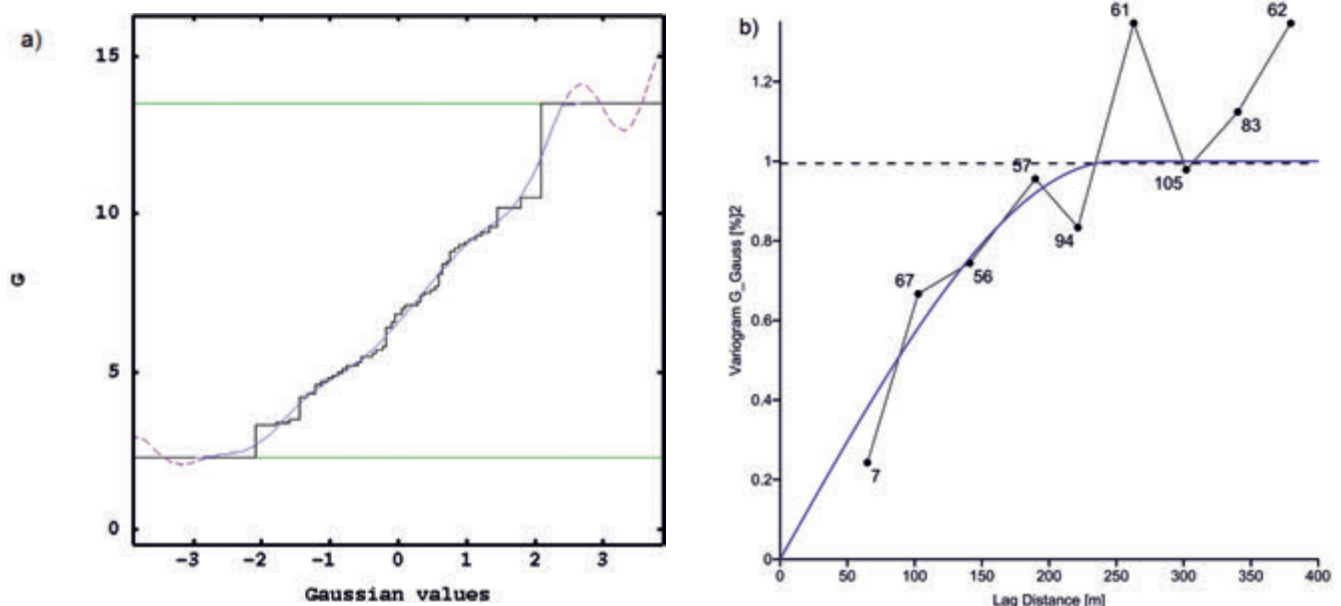
zidentyfikować nie tylko najbardziej prawdopodobny ale również każdy możliwy przebieg analizowanego zjawiska, a więc umożliwia ocenę odchyłań od najbardziej prawdopodobnych wartości średnich. Wnioski z tak przeprowadzonych analiz umożliwiają ocenę ryzyka i mogą być przydatne do podejmowania decyzji o charakterze biznesowym w sprawie zasadności i opłacalności odzysku pozostałości węglowej z odpadów.

Na podstawie doświadczeń z podobnych obiektów przyjęto, że ewentualna eksploatacja składowiska może być wykonywana metodą ścianową z wykorzystaniem koparek jednonacyniowych. W takim przypadku materiał będzie wybierany na całej wysokości piętra składowiska. Selektowna eksploatacja warstwami poziomymi nie ma uzasadnienia technologicznego. W procesie urabiania koparką nastąpi homogenizacja pionowa materiału, dlatego mimo obserwowanej dużej zmienności pionowej w rdzeniach otworów w przeprowadzonych analizach odstąpiono od badania jakości poszczególnych warstw. Zamiast tego zdecydowano się na badanie wartości średnich reprezentatywnych dla całej długości rdzeni otworów rozpoznawczych.

Analizy zawartości węgla  $G$  [%] w odpadach wykonano z zastosowaniem symulacji warunkowej metodą sekwencyjną Gaussa w odmianie blokowej o rozmiarze bloku  $20 \times 20$  m z wykorzystaniem algorytmu w specjalistycznym pakiecie Isatis dedykowanym do wykonywania analiz geostatystycznych [1]. W procesie symulacji wykonano 25 realizacji złoża. Wszystkie realizacje oparte na obserwacjach są prawdopodobne, niepowtarzalne i oddają charakter zmienności parametru wynikający z wariogramu. Ze względu na duże różnice pomiędzy poszczególnymi realizacjami analiza każdej realizacji z osobna nie jest przydatna w procesie decyzyjnym, dlatego wykonano dodatkową obróbkę statystyczną a wyniki zaprezentowano na kilku mapach, w tym: skrajne realizacje – minimalistyczną i maksymalistyczną, wynikową mapę średnią z wszystkich realizacji, mapę odchylenia standardowego realizacji oraz mapę prawdopodobieństwa przekroczenia założonej wartości progowej parametru  $G$  przyjętej jako wartość krytyczna decydująca o opłacalności eksploatacji odpadów.



Rys. 1. Histogram wartości średnich parametru  $G$  w otworach rozpoznawczych (a), histogram znormalizowany w wyniku anamorfozy (b)  
Fig. 1. The histogram of mean values of the parameter  $G$  in boreholes (a), normalized histogram, the effect of the Gauss anamorphosis process (b)



Rys. 2. Diagram anamorfozy Gaussa wraz z dopasowanym modelem (a), wariogram zawartości węgla w odpadach obliczony na podstawie danych znormalizowanych z dopasowanym modelem sferycznym (b)

Fig. 2. The diagram of Gaussian anamorphosis with a model (a), the normalized variogram of coal content with a spherical model (b)

Symulacja warunkowa metodą sekwencyjną Gaussa [2], [3], [4] wykonywana jest na danych, które wykazują rozkład normalny, o średniej równej  $m=0$  i odchyleniu standardowym równym  $s=1$ . Oczywiście żaden naturalny materiał obserwacyjny nie spełnia takich rygorów, dlatego zanim przeprowadzi się symulację należy wykonać proces anamorfozy Gaussa, czyli sztuczne przekształcenie danych ze zbioru obserwacji na zbiór o rozkładzie normalnym. Na rysunku 1 pokazano histogram parametru  $G$  z obserwacji w otworach badawczych (rys. 1a) oraz histogram znormalizowany w wyniku anamorfozy Gaussa (rys. 1b).

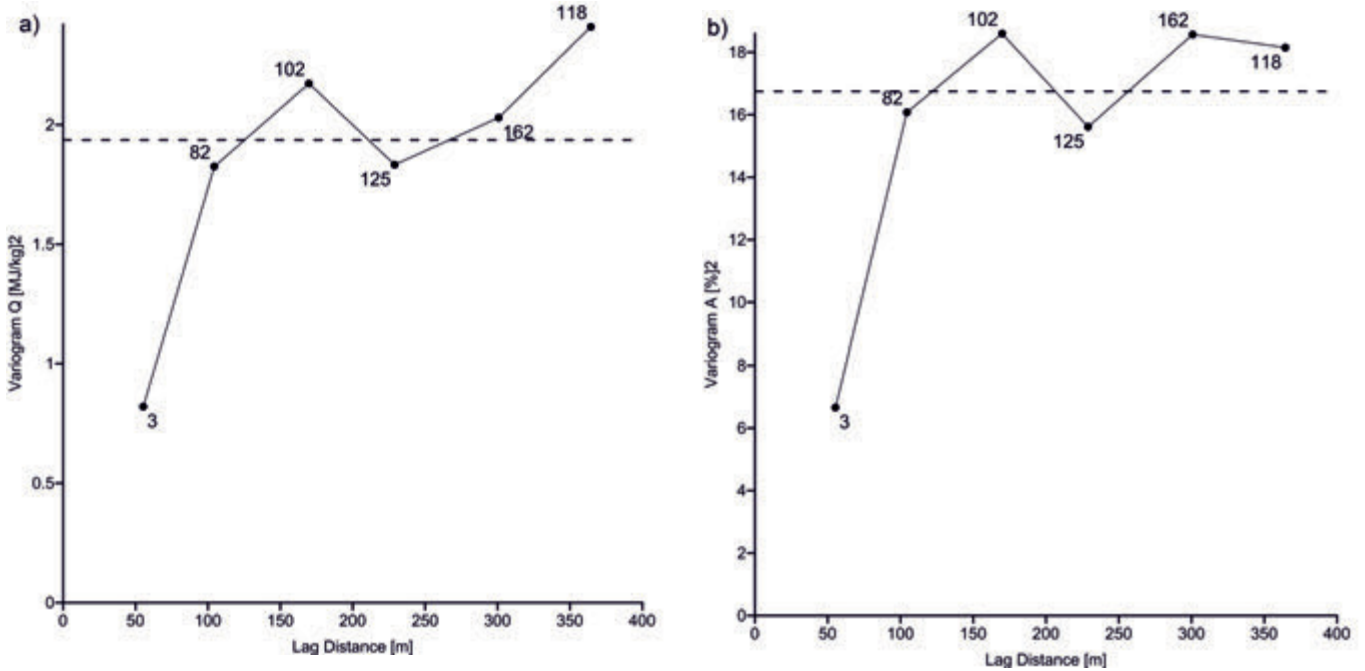
Na rysunku 2a pokazano wykres zależności pomiędzy obserwacjami i rozkładem znormalizowanym. Do wykresu dopasowano model anamorfozy w postaci funkcji, która jest wykorzystana w ostatnim kroku symulacji sekwencyjnej Gaussa czyli w procesie odwróconej anamorfozy wyników symulacji. W procesie modelowania funkcji anamorfozy wykorzystywane

są wielomiany Hermite'a [1]. W procesie symulacji danych znormalizowanych stosuje się model wariogramu, który oddaje strukturę zmienności obserwacji znormalizowanych. Na rysunku 2b przedstawiono wariogram zawartości węgla w odpadach obliczony na podstawie danych znormalizowanych. Oczywiście jest, że wariancja wskazana przerywaną linią poziomą na wykresie wariogramu jest bliska jedności, tak jak wariancja danych znormalizowanych.

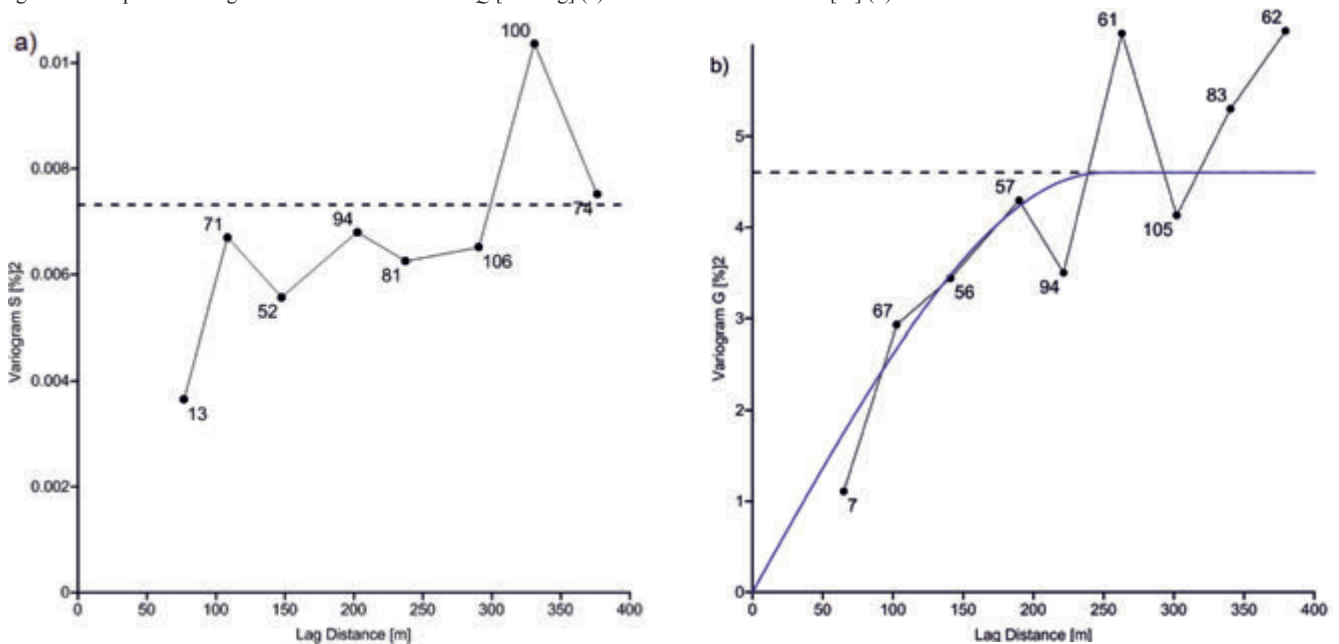
## Wyniki

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono wariogramy empiryczne analizowanych parametrów złoża antropogenicznego: wartości opałowej  $Q$  [MJ/kg], popielności  $A$  [%], zawartości siarki w węglu  $S$  [%] oraz zawartości węgla w odpadach  $G$  [%].

W zmienności zawartości siarki w węglu  $S$  [%] (rys. 4a)

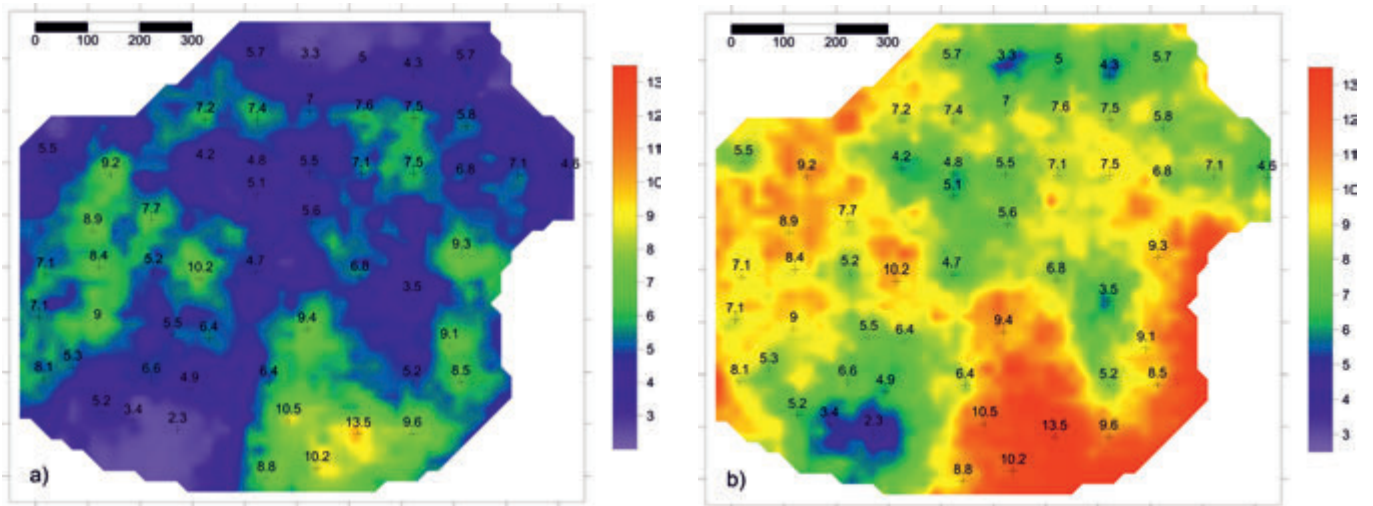


Rys. 3. Wariogramy empiryczne wartości opałowej węgla  $Q$  [MJ/kg] (a) i popielności węgla  $A$  [%] (b)  
Fig. 3. The empirical variograms of coal calorific value  $Q$  [MJ/kg] (a) and ash content of coal  $A$  [%] (b)

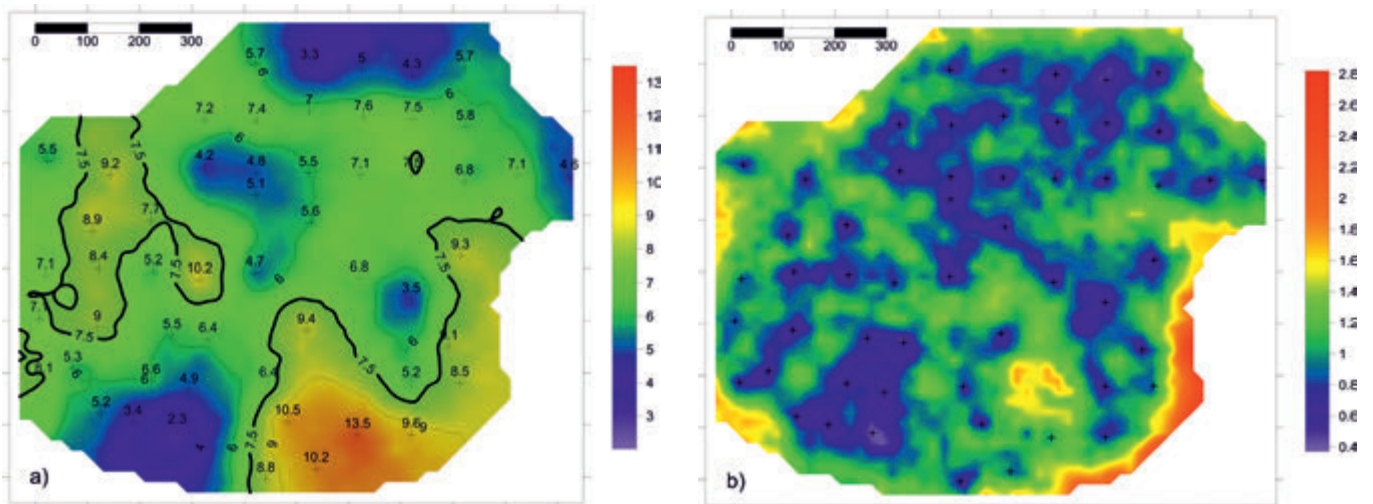


Rys. 4. Wariogramy empiryczne zawartości siarki w węglu  $S$  [%] (a) oraz zawartości węgla w odpadach  $G$  [%], do wariogramu  $G$  dopasowano model sferyczny (b)  
Fig. 4. The empirical variogram of sulfur content of the coal  $S$  [%] (a) and the carbon content in the waste  $G$  [%], with spherical model  $G$  (b)

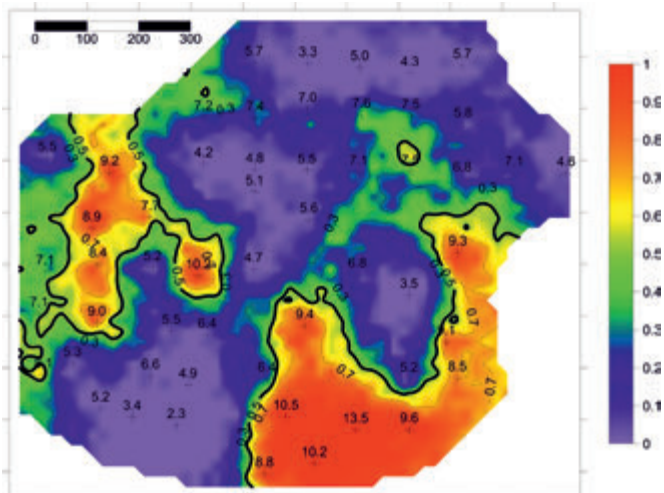




Rys. 5. Ekstremalne wyniki symulacji wybrane spośród 25 realizacji - minimalistyczna (a) i maksymalistyczna (b). Dla wizualizacji zastosowano jednolitą skalę barw  
 Fig. 5. Extreme simulation results selected from 25 realizations - minimum (a) and maximum (b). For visualization of the differences between maps the uniform color scale has been used



Rys. 6. Wyniki obróbki statystycznej 25 realizacji – mapa wartości średnich z 25 realizacji (a) i mapa odchylenia standardowego z 25 realizacji (b)  
 Fig. 6. The results of simulation postprocessing – the map of mean (a) and the map of standard deviation (b)



Rys. 7. Mapa prawdopodobieństwa przekroczenia wartości krytycznej parametru  $G = 7,5\%$   
 Fig. 7. The cutoff map giving the probability that parameter  $G$  exceeds critical threshold  $G = 7,5\%$

oraz zawartości węgla w odpadach  $G$  [%] (rys. 4b) widoczna jest autokorelacja. Wariogramy parametrów jakościowych  $Q$  i  $A$  (rys. 3) węgla wskazują na pewien rodzaj nielosowości ale zasięg autokorelacji jest znacząco mniejszy niż w przypadku

parametrów  $G$  i  $S$ , sięgający ok. 100 m. Wyraźnie mniejsze wartości wariogramów w pobliżu osi pionowej wynikają z uwzględnienia zaledwie 3 par obserwacji. Ich wartość statystyczna jest zatem znikoma. Wśród parametrów jakościowych wyjątkiem jest zawartość siarki w węglu  $S$  [%]. W kształcie wariogramu widoczna jest autokorelacja a jej zasięg dochodzi do 200 m (rys. 4a). W strukturze zmienności parametru  $G$  wyraźny jest udział pierwiastka nielosowego (rys. 4b). Zasięg autokorelacji dochodzi do ok. 300 m, co trzykrotnie przewyższa średnią odległość pomiędzy otworami. Na podstawie wyników analizy wariogramów odstąpiono od modelowania zmienności parametrów jakościowych  $Q$  i  $A$ . Dla ilustracji zmienności tych parametrów można się ograniczyć do opisu statystycznego. Wykonywanie map izoliniowych z powodu nieznaczącej autokorelacji, której zasięg nie wykracza poza odległości pomiędzy otworami nie ma uzasadnienia [5].

Parametr  $G$  analizowano pod kątem występowania zmienności kierunkowej (anizotropii). We wszystkich kierunkach wariogram empiryczny był stabilny tak pod kątem kształtu jak i zasięgu autokorelacji. Dlatego do modelowania przyjęto model izotropowy.

Metodą symulacji warunkowej Gaussa wykonano 25 modeli tzw. realizacji. Na rysunku 5 przedstawiono dwie skrajne

realizacje – minimalistyczną (rys. 5a) oraz maksymalistyczną (rys. 5b). Na rysunku 6 przedstawiono mapę średniej z 25 realizacji (rys. 6a) oraz mapę odchylenia standardowego (rys. 6b). Na rysunku 7 na podstawie wykonanych realizacji przedstawiono mapę prawdopodobieństwa przekroczenia wartości krytycznej  $G=7,5\%$ . Wartość tę przyjęto jako hipotetyczną zawartość węgla decydującą o opłacalności eksploatacji i odzysku węgla z odpadów.

Na mapie średniej z 25 realizacji (rys. 6a) podkreślono izolinię  $G=7,5\%$  i zacięziono części zwałowiska, w których parametr  $G$  spełnia warunek  $G \geq 7,5\%$ . Na rysunku 7 pokazano mapę prawdopodobieństwa spełnienia tego warunku. Warto zwrócić uwagę, że mapie średniej z symulacji (rys. 6a) obszary spełniające założony warunek  $G \geq 7,5\%$  na mapie prawdopodobieństwa (rys. 7) ograniczone są pogrubioną izolinią wyznaczoną przez prawdopodobieństwo  $P_{(G=7,5\%)}=50\%$ . Dopiero obszary o barwie czerwonej wykazują prawdopodobieństwo spełnienia warunku  $P_{(G=7,5\%)} \geq 70\%$ . Mapa prawdopodobieństwa (rys. 7) wskazuje z jakim poziomem niepewności należy odczytywać wartości przedstawione na mapie średniej (rys. 6a). Pod względem formalnym nie ma w tych dwóch mapach żadnej sprzeczności. Wartość średnią należy zawsze odczytywać wraz z informacją o odchyleniu standardowym oszacowania wartości średniej (rys. 6b). W interesujących obszarach odchylenie standardowe przyjmuje wartości z zakresu od 0,6% do nawet 1,8%. To znaczy, że na mapie średniej w obszarach, w których  $G=7,5\%$  rzeczywiste wartości tego parametru mogą się wahać w zakresie od 5,7% do 9,3% z prawdopodobieństwem 68,3%, albo od 3,9% do 11,1% z prawdopodobieństwem 95,4%.

W procesie podejmowania decyzji dotyczącej eksploatacji odpadów i odzyskiwania z nich pozostałości węglowej mapa zmienności zawartości węgla, na której przedstawiono prawdopodobieństwo spełnienia warunku krytycznego (rys. 7) stanowi rzetelną informację i umożliwia ocenę ryzyka podjęcia eksploatacji. Jest ona łatwiejsza w interpretacji niż mapa wartości średnich wraz z mapą odchylenia standardowego (rys 6).

## Dyskusja wyników

Struktura zmienności zawartości węgla w odpadach  $G$  wykazuje wyraźne cechy nielosowe i relatywnie duży zasięg autokorelacji wykraczający znacznie ponad średnią odległość pomiędzy otworami rozpoznawczymi. Zaskakująca autokorelacja zawartości węgla w złożu antropogenicznym może mieć kilka powodów. Parametr ten nie jest zależny od cech złożowych, które różnicują węgle pochodzące z różnych kopalń i różnych pokładów. Zależy głównie od technologii przeróbki w konkretnym zakładzie przerobczym. Jeżeli proces przeróbki nie był doskonały to do odpadów przedostawało się wiele węgla. Podobne pod względem zawartości węgla odpady ładowane na skład pociągu były w sposób uporządkowany lokowane wzdłuż torów na składowisku. Wyładunek z pociągu odbywał się w dłuższym okresie czasu w jednym miejscu, dlatego odpady o podobnej zawartości węgla były składowane w określonym miejscu składowiska.

W odróżnieniu od parametru  $G$  cechy jakościowe węgla –  $Q$ ,  $A$  zależą przede wszystkim od miejsca wydobycia czyli nie tylko od kopalni ale również od położenia frontów eksploatacyjnych i głębokości zalegania eksploatowanego pokładu. Parametry jakościowe węgla są znacznie zróżnicowane nie

tylko w obrębie Górnego Śląska ale nawet w obrębie jednej kopalni. Węgiel z kilku wyrobisk trafia do jednego skipu w szybie kopalni i potem do zakładu przerobczego. Na każdym etapie wydobycia, transportu i przeróbki dokonuje się proces mieszania – homogenizacji. W ten sposób autokorelacja parametrów jakościowych obserwowanych w złożu zanika, tym bardziej trudno jej oczekiwać w resztkach węgla na składowisku. Dlatego w przypadku parametrów jakościowych  $Q$  i  $A$  w procesie interpretacji wyników wierceń odstąpiono od stosowania metod geostatystycznych. Zaskakującym wyjątkiem wśród parametrów jakościowych jest zawartość siarki w węglu  $S$ , w zmienności której widoczna jest autokorelacja o zasięgu ok. 200 m.

## Podsumowanie i wnioski

Poprawne wykonanie symulacji geostatystycznej przy pomocy specjalistycznego softwaru jest czasochłonne i wymaga pewnej wiedzy oraz doświadczenia od użytkownika. Mimo to, czas poświęcony na modelowanie znakomicie się opłaca. Wyniki modelowania z użyciem symulacji umożliwiają oszacowanie ryzyka wynikającego z budowy składowiska, co może być bardzo przydatne w procesie podejmowania decyzji dotyczących eksploatacji złoża antropogenicznego. Z pojedynczych realizacji trudno jest wyciągać wnioski. Duże zróżnicowanie poszczególnych realizacji wynika z dostępnych obserwacji w otworach rozpoznawczych oraz ze zdiagnozowanej metodą wariogramów zmienności przestrzennej parametrów złoża. Różnice pomiędzy skrajnymi realizacjami wskazują na skalę niepewności albo skalę niewiedzy z jaką mamy do czynienia interpretując zmienność parametrów złoża na podstawie dyskretnej informacji z otworów rozpoznawczych. Doświadczenia górnicze potwierdzają obserwacje wykonane metodami matematycznymi. Górnicy w trakcie eksploatacji zmuszeni są wielokrotnie do weryfikacji swoich oczekiwań co do parametrów złożowych. W wyniku obserwacji wykonanych w procesie eksploatacji złoża najczęściej obniża się szacunki wielkości zasobów albo szacunki parametrów jakościowych złoża, chociaż zdarzają się również w przypadku weryfikacji w drugą stronę, kiedy to w trakcie udostępnienia złoża okazywało się, że jego parametry są korzystniejsze niż szacowano na podstawie dokumentacji geologicznej.

Na podstawie przedstawionych analiz sformułowano następujące wnioski:

- W strukturze zmienności badanych parametrów złoża antropogenicznego przeważa charakter losowy. W przypadku zawartości węgla w odpadach zauważono zaskakująco duży udział składnika nielosowego i relatywnie duży zasięg autokorelacji.
- Zmienność parametrów jakościowych węgla z wyjątkiem zawartości siarki wykazuje cechy losowe, co nie upoważnia do wykonywania map izoliniowych. Dla ilustracji zmienności tych parametrów wystarczający jest opis statystyczny.
- Ze względu na charakter złoża antropogenicznego i technologię składowania odpadów do modelowania zmienności zawartości węgla w odpadach zastosowano symulację geostatystyczną. Symulacja w odróżnieniu od metod interpolacyjnych umożliwia wykazanie możliwych odchyleń od wartości średniej.
- Pojedyncze realizacje symulacji bardzo się od siebie róż-



- nią. Dla ułatwienia interpretacji wyników symulacji konieczne jest wykonanie dodatkowej obróbki statystycznej zbioru realizacji (rys. 5, 6 i 7).
- Mapa wartości średniej wykonana na podstawie opracowania wyników symulacji powinna być zawsze interpretowana wraz z mapą odchylenia standardowego.
  - W ocenie złoża pod kątem decyzji o ewentualnej eksploatacji i odzysku pozostałości węglowej przydatna i łatwa w interpretacji jest mapa prawdopodobieństwa spełnienia warunku krytycznego, w tym przypadku przyjętego na poziomie  $G=7,5\%$  (rys. 7).

*Publikacja została wykonana w ramach prac statutowych, nr umowy 11.11.100.597*

## Literatura

- [1] Bleines C., Perseval S., Rambert F., Renard D., Touffait Y., *Isatis. Isatis software manual*, Geovariances & Ecole Des Mines, Paris, s. 710, 2004
- [2] Chiles C. V., Delfiner P., *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*, New York: John Wiley&Sons, 449-471, 1999
- [3] Dietrich C. R., Newsam G. N., *A fast and exact method for multidimensional Gaussian stochastic simulations*, Water Resources Research 29 (8): 2861-2899, 1993
- [4] Journel A. G., *Geostatistics for conditional simulation of ore bodies*, Economic Geology 69: 673-687, 1974
- [5] Mucha J., *Bariery i ograniczenia geostatystycznej oceny parametrów złożowych*, Zeszyty Naukowe AGH, Geologia t. 27, z. 2-4, s. 641-658, 2001
- [6] Nieć M., Uberman R., *Zwały jako antropogeniczne złoża wtórne*, Gospodarka Surowcami Mineralnymi, t. 11, z. 3., 1995
- [7] Nieć M., Uberman R., *Problemy formalnoprawne gospodarki kopalinami towarzyszącymi i mineralnymi surowcami odpadowymi*, Górnictwo Odkrywkowe, R. 43, nr 2-3, 2001
- [8] Rozporządzenie Ministra Ochrony Środowiska Zasobów Naturalnych i Leśnictwa z dnia 23 sierpnia 1994 r. w sprawie określenia przypadków, w których niezbędne jest sporządzenie dokumentacji innej niż dokumentacja geologiczna złoża kopaliny, hydrogeologiczna i geologiczno-inżynierska (Dz. U. Nr 93, poz. 443) – rozporządzenie aktualnie nieobowiązujące
- [9] Sałaciński R., *Złoża antropogeniczne – problemy praktyczne i prawne*, Górnictwo Odkrywkowe, R. 48, nr 1-2, 2006
- [10] Uberman R., *Złoża antropogeniczne – problem wirtualny czy realny?*, Górnictwo Odkrywkowe, R. 53, nr 1-2, 2012
- [11] Uberman R., Uberman R., *Metody wyceny wartości złóż antropogenicznych*, Gospodarka Surowcami Mineralnymi, t. 23, z. 2, 2007



*Arboretum w Wojsławicach*

fot. z archiwum Arboretum