

Barbara Namysłowska-Wilczyńska, Bożena Skorupska, Andrzej Wieniewski

## Analiza geostatystyczna zmienności parametrów technologicznych popiołożuźli zdeponowanych na składowisku odpadów przemysłowych

Zastosowanie metod geostatystycznych (estymacyjnych, symulacyjnych) w wielu dyscyplinach i dziedzinach nauki, a także ich wykorzystanie do rozwiązywania zagadnień interdyscyplinarnych, było wielokrotnie opisywane w literaturze [1,2,6,14]. Dotyczy to niewątpliwie nauk o Ziemi, takich jak m.in. geologia i górnictwo [6, 7, 9, 13, 14], ochrona środowiska [3–6, 11], klimatologia [8, 14], geofizyka [14], geochemia, oceanologia, epidemiologia, meteorologia, leśnictwo, a także takich dziedzin nauki, jak materiałoznawstwo oraz energetyka [6, 12]. Szerokie możliwości narzędzi geostatystyki, pozwalających na modelowanie zmiennych zregionalizowanych, szacowanie średnich estymowanych ( $Z^*$ ) i prognozowanie wartości symulowanych ( $Z_s$ ) analizowanych parametrów charakteryzujących różne zjawiska, a także uniwersalny charakter podejścia metodycznego zachęcają badaczy do wypróbowania tych technik w rozwiązywaniu nowych obszarów tematycznych. Cenną zaletą metod geostatystycznych jest uzyskiwanie minimalnej wariancji oszacowania ( $\sigma_k^2$ ), bądź wariancji symulacji ( $\sigma_s^2$ ), podczas wyznaczania wartości  $Z^*$  i  $Z_s$ , a także kilkunastu innych parametrów opisujących jakość wykonanych estymacji.

Celem wykonanych analiz przestrzennych było opracowanie modelu geostatystycznego (3D) zmienności parametrów technologicznych charakteryzujących popiołożuźle zdeponowane na składowisku odpadów przemysłowych, związanym z działalnością sektora energetycznego, mieszczącym się w pobliżu Torunia (Świecie) w województwie kujawsko-pomorskim.

Zaprezentowano wybrane wyniki analizy przestrzennej zmienności dwóch podstawowych parametrów technologicznych popiołożuźli – wilgotności (W) oraz zawartości popiołu ( $A_0$ ). Przedstawiono także wyniki modelowania przebiegu wariogramów tych parametrów z użyciem funkcji wariogramu kierunkowego oraz estymacji wartości średnich ( $Z^*$ ), przeprowadzonej z wykorzystaniem krigingu zwyczajnego (blokowego). W pracy nawiązano do wyników oszacowania podstawowych statystyk zawartości węgla organicznego (C) i wzbogacalności ( $e'$ ) popiołożuźli oraz wyników badań współzależności wartości tych parametrów technologicznych popiołożuźli [10, 13].

### Przedmiot i zakres badań

Przedmiot badań statystycznych i geostatystycznych stanowił zbiornik A, wydzielony w obrębie obszaru składowiska popiołożuźli (rys. 1). Wymiary rozpatrywanej części hałdy popiołożuźli wynosiły  $150\text{ m} \times 400\text{ m} \times 10\text{ m}$ . Ciężar właściwy materiału zgromadzonego w tym zbiorniku wynosił  $1,948\text{ g/cm}^3$ . Próbkę do badań pobrano z 12 otworów badawczych, wykonanych na obszarze zbiornika A, o głębokości od 1 m do 10 m. Liczba pobranych próbek wynosiła  $n=120$ . Oznaczenia zawartości popiołu ( $A_0$ ), węgla organicznego (C), wilgotności (W) oraz badania wzbogacalności ( $e'$ ) popiołożuźli wykonano w Instytucie Metali Nieżelaznych w Gliwicach (w Laboratorium Zakładu Przeróbki Surowców Mineralnych i Utylizacji Odpadów oraz w Laboratorium Chemii Analitycznej). Wzbogacalność definiuje się jako ilość odzyskanego węgla (kg) z 1 tony popiołożuźla. Parametr  $e'$  jest iloczynem tej ilości i zawartości węgla w danej próbce.

W pierwszej kolejności opracowano bazę danych (w układzie 3D), dotyczących czterech parametrów technologicznych. W bazie danych zamieszczono wartości współrzędnych (X, Y, Z) określających miejsca poboru próbek (Z – głębokość) i badanych zmiennych zregionalizowanych. Zawartość tej bazy stanowiła podstawę analiz przestrzennych. Przedmiot analiz przestrzennych stanowiło zróżnicowanie wartości wilgotności (W) i zawartości popiołu ( $A_0$ ) w popiołożuźlach. Oszacowano podstawowe statystyki i histogramy rozkładów rozważanych parametrów, a ponadto zbadano korelację przestrzenną pomiędzy ich wartościami.

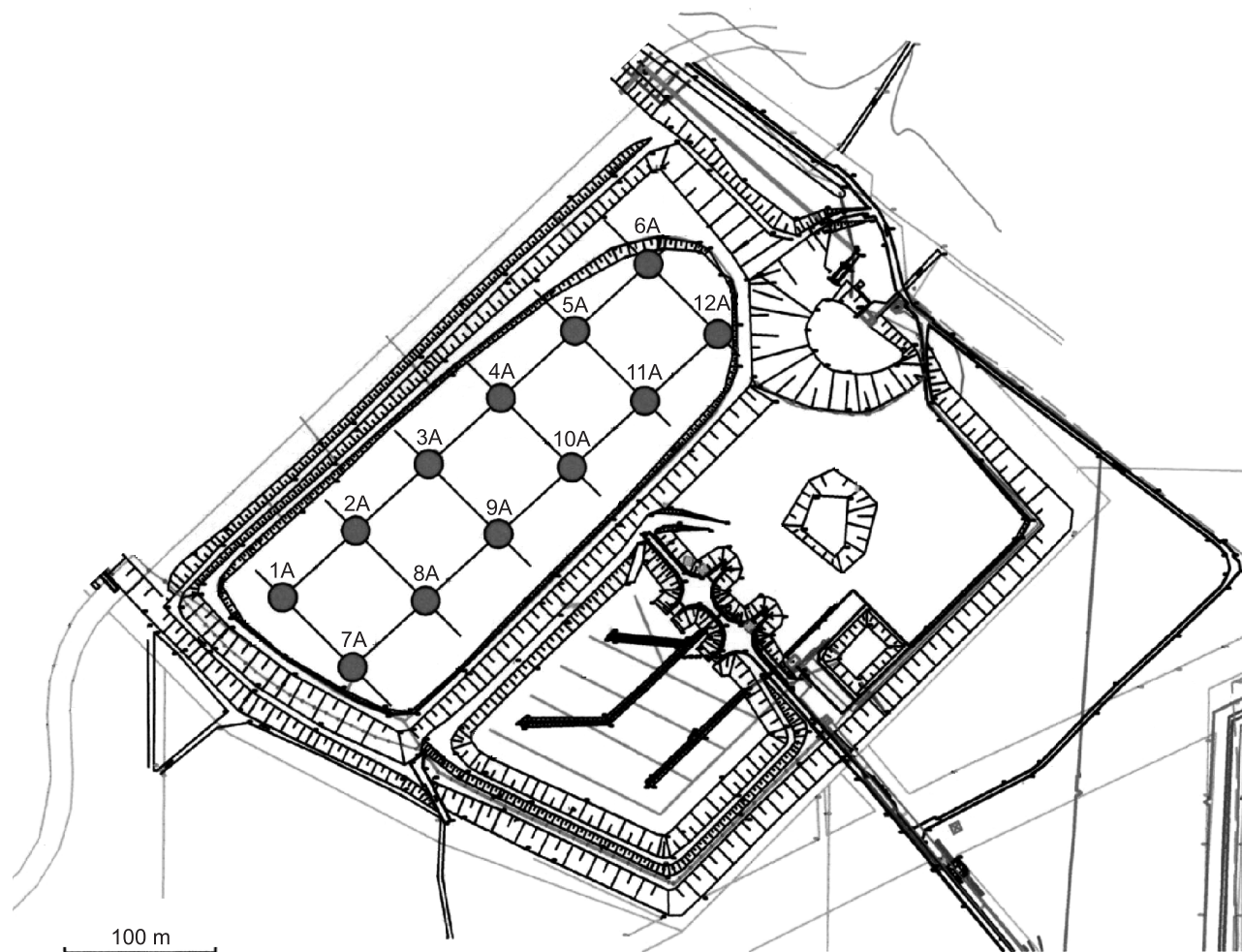
Analizy statystyczne i geostatystyczne przeprowadzono z wykorzystaniem wybranych programów komputerowych, zawartych w pakiecie oprogramowania ISATIS – wersja 11.0.3 (Geostatistics & Ecole Des Mines de Paris w Avon Cedex, France).

### Podstawowe statystyki parametrów technologicznych

Zmienność wartości parametrów technologicznych popiołożuźli była wyraźnie zróżnicowana na analizowanym obszarze składowiska odpadów (zbiornik A). Wyniki oceny podstawowych statystyk, uzyskane na podstawie danych oryginalnych, świadczyły o ich zróżnicowanym zachowaniu, w zależności od rodzaju parametru [10, 13].

Prof. dr hab. B. Namysłowska-Wilczyńska: Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Zakład Geologii Inżynierskiej i Środowiskowej, Wybrzeże S. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław [barbara.namyslowska-wilczynska@pwr.wroc.pl](mailto:barbara.namyslowska-wilczynska@pwr.wroc.pl)

Dr inż. B. Skorupska, dr inż. A. Wieniewski: Instytut Metali Nieżelaznych, ul. J. Sowińskiego 5, 44-100 Gliwice



Rys. 1. Mapa rozmieszczenia otworów wierniczych w obrębie składowiska popiołożużli (zbiornik A) w rejonie Świecia  
Fig. 1. Map of borehole spacing within the ash-slag disposal site (Tank A) in the area of Swiecie

Zawartość popiołu ( $A_0$ ) wykazywała małe zróżnicowanie (współczynnik zmienności  $V=8\%$ ), zaś wilgotność ( $W$ ) cechowała się przeciętnymi zmianami ( $V=25\%$ ) (tab. 1). Dużą zmienność stwierdzono w przypadku zawartości węgla organicznego ( $C$ ) i wzbogacalności ( $e'$ ) –  $V=53\div 59\%$ .

Tabela 1. Podstawowe statystyki parametrów technologicznych popiołożużli ( $n=120$ )  
Table 1. Basic statistics of technological parameters of ash-slugs ( $n=120$ )

Parametr	$X_{\min}$ %	$X_{\max}$ %	$X$ %	$S$ %	$V$ %
$A_0$	65,14	95,78	84,02	6,49	8,00
$W$	8,84	36,43	23,64	6,01	25,00

Histogram rozkładu zawartości popiołu cechował się asymetrią lewostronną. Podobną, jednakże słabszą tendencję rozkładu o zaznaczającej się skośności ujemnej można było dostrzec na histogramie wilgotności. Wartości współczynnika skośności ( $g_1$ ) tych histogramów zawierały się w granicach od  $-0,28$  ( $W$ ) do  $-0,53$  ( $A_0$ ). Histogramy zawartości węgla organicznego i wzbogacalności miały natomiast asymetrię prawostronną o współczynniku skośności dodatniej ( $g_1$ ), którego wartości były zawarte w granicach od  $0,88$  ( $C$ ) do  $0,94$  ( $e'$ ). Współczynniki spłaszczenia (kurtozy) ( $g_2$ ) badanych histogramów osiągały małe wartości zmieniające się w granicach od  $2,40$  do  $3,49$ .

### Współzależności parametrów technologicznych

Wartości współczynnika korelacji liniowej ( $r$ ) wskazywały na istnienie przestrzennego skorelowania pomiędzy wartościami badanych parametrów technologicznych (tab. 2), przy czym korelacja ta była zróżnicowana w obszarze występowania popiołożużli. Wystąpiła silna przestrzenna korelacja odwrotna (ze znakiem ujemnym) pomiędzy zawartością popiołu i zawartością węgla organicznego ( $r=-0,75$ ), zawartością popiołu i wilgotnością ( $r=-0,75$ ) oraz zawartością popiołu i wzbogacalnością ( $r=-0,70$ ). Najsilniejsza korelacja przestrzenna ze znakiem dodatnim zaznaczyła się między zawartością węgla organicznego i wzbogacalnością ( $r=0,98$ ).

Tabela 2. Współczynniki korelacji liniowej ( $r$ ) parametrów technologicznych popiołożużli ( $n=120$ )  
Table 2. Linear correlation coefficients ( $r$ ) of technological parameters of ash-slugs ( $n=120$ )

Parametr	$A_0$ , %	$C$ , %	$W$ , %	$e'$ , kg/t
$A_0$ , %	1,00	-0,75	-0,75	-0,70
$C$ , %	-0,75	1,00	0,67	0,98
$W$ , %	-0,75	0,67	1,00	0,67
$e'$ , kg/t	-0,70	0,98	0,67	1,00

### Strukturalna zmienność parametrów technologicznych

Badano strukturę przestrzennej zmienności parametrów technologicznych, dokonując analizy strukturalnej (wariogramicznej) z użyciem funkcji  $\gamma(h)$  wariogramu. W przebiegach wariogramów kierunkowych, obliczonych wraz z głębokością pobrania próbek w otworach wiertniczych, stwierdzono wyraźny trend wznoszący wartości funkcji  $\gamma(h)$ . Najsilniejszą tendencję wzrostu wartości  $\gamma(h)$  stwierdzono na wariogramach zawartości węgla organicznego (C) i wzbogacalności ( $e'$ ) [10, 13]. Przebiegi tych wariogramów aproksymowano modelem sferycznym ( $e'$ ) lub modelem sferycznym i liniowym (C), bądź dwoma modelami, w połączeniu z efektem samorodków ( $C_0$ ) ( $A_0$ , W). Stwierdzono wyraźnie większy dystans skorelowania zawartości węgla organicznego, tj. zaznaczyły się dwa zasięgi oddziaływania (a) wariogramu ( $a=76,89$  m i  $a=95,54$  m), w porównaniu do zasięgów wariogramów wzbogacalności ( $a=13,22$  m), wilgotności ( $a=14,42$  m) i zawartości popiołu ( $a=13,47$  m i  $a=11,26$  m) (tab. 3, rys. 2). Efekt samorodków stwierdzono w przebiegach wariogramów zawartości popiołu i wilgotności (tab. 3), wyraźniej zaznaczający się na wariogramie  $A_0$ , natomiast w przebiegach wariogramów C i  $e'$  efekt  $C_0$  nie występował, co wskazywało na brak gwałtownych zmian wartości  $\gamma(h)$ .

Tabela 3. Zestawienie wartości parametrów geostatystycznych modeli wariogramów kierunkowych (wzdłuż osi Z)

Table 3. Values of geostatistical model parameters of directional variograms (along axis Z)

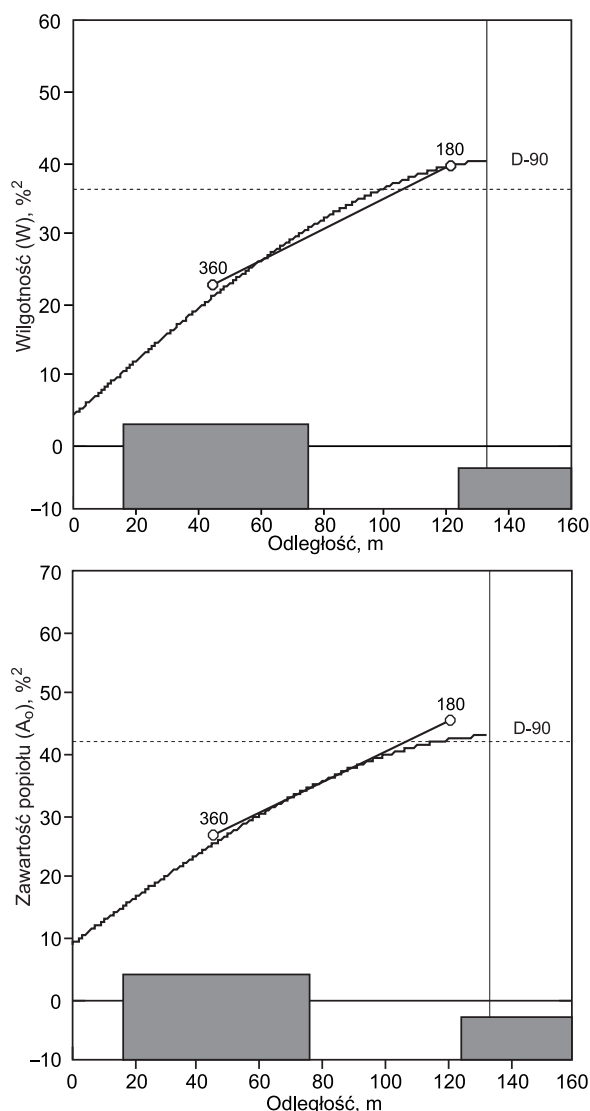
Parametr	Struktura modelu	$C_0$ % <sup>2</sup>	$C'$ % <sup>2</sup>	C % <sup>2</sup>	a m
W	sferyczny liniowy	4,50	34,20 3,61	42,31	14,42 14,42
$A_0$	sferyczny sferyczny liniowy	9,01	28,13 4,22 4,22	36,57	13,47 11,26 11,26

$C'$  – cząstkowa wariancja progowa, C – całkowita wariancja progowa

### Estymacja wartości parametrów technologicznych

W kolejnym etapie badań geostatystycznych zastosowano kriging zwyczajny (blokowy). Wykonano szacowanie (3D) średnich estymowanych ( $Z^*$ ) i standardowego odchylenia estymacji ( $\sigma_k$ ) w zależności od głębokości zalegania popiołożużli na obszarze zbiornika A, w przedziale 1÷10 m. W obliczeniach krigingowych przyjęto przestrzenną (3D) siatkę o wymiarach bloku elementarnego 5 m × 5 m × 1 m. Całkowita liczba węzłów sieciowych, uwzględnionych w estymacji, osiągnęła 34090 (wzdłuż osi X – 63, Y – 59 i Z – 10). Wysokość plastrowania (cięcia) wzdłuż osi Z, przyjęta podczas estymacji, wynosiła 1 m.

Obliczenia wykonano z uwzględnieniem wartości parametrów geostatystycznych modeli odwzorowujących przebiegi kierunkowych wariogramów wilgotności i zawartości popiołu (tab. 3). Otrzymano nowe bazy danych gridowych (wyjściowych), zawierające 34090 wartości dotyczących odpowiednio współrzędnych X, Y i Z, w odniesieniu do środków bloków siatki elementarnej oraz średnich estymowanych ( $Z^*$ ) i wartości standardowych odchyłeń estymacji ( $\sigma_k$ ). Dane gridowe mogą zostać poddane dalszemu przetwarzaniu, stanowiąc podstawę do dokonania kolejnych analiz przestrzennych i wizualizacji ich wyników, czyli



Rys. 2. Wariogramy kierunkowe zawartości popiołu i wilgotności popiołożużli wraz z dopasowanym modelem teoretycznym oraz histogramy liczebności par próbek

Fig. 2. Directional variograms of moisture content and ash content in the ash-slags (with the fitted theoretical model)

sporządzenia map rastrowych, izolinowych, gradientowych, przekrojów sieciowych itp.

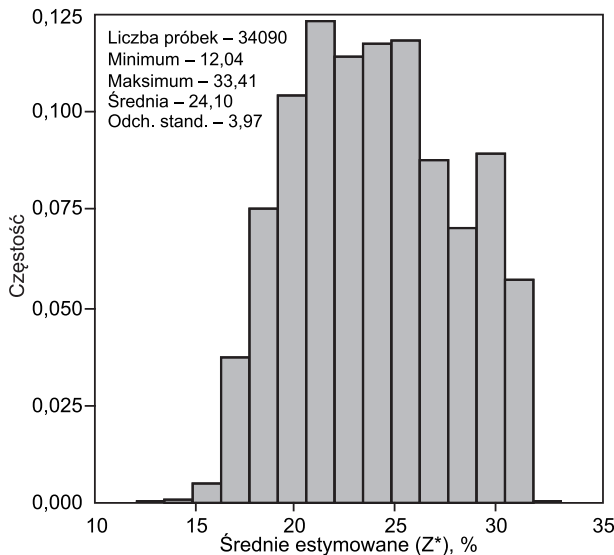
Kształt histogramu rozkładu średnich ( $Z^*$ ) wilgotności popiołożużli był zbliżony do rozkładu symetrycznego (rys. 3.) o współczynniku  $g_1$  wynoszącym zaledwie 0,08, natomiast histogram wilgotności, obliczony z wykorzystaniem danych oryginalnych, wykazywał niewielką tendencję do skośności ujemnej. Wartości współczynnika zmienności (V) średnich estymowanych ( $Z^*$ ) i standardowego odchylenia estymacji ( $\sigma_k$ ) wilgotności popiołożużli świadczyły o małych zmianach wartości obu parametrów (tab. 4).

Tabela 4. Statystyki wartości parametrów geostatystycznych wilgotności popiołożużli (W) w węzłach przestrzennej siatki elementarnej (kriging zwyczajny blokowy, liczba węzłów sieciowych 34090)

Table 4. Statistics of geostatistical parameters of ash-slag moisture (W) in the nodes of 3D elementary grid (ordinary block kriging; number of grid nodes, 34090)

Parametr	$X_{min}$ kg/t	$X_{maks}$ kg/t	X kg/t	S kg/t	V kg/t
$Z^*$	12,04	33,41	24,10	3,97	16,00
$\sigma_k$	1,92	10,55	7,23	1,15	16,00

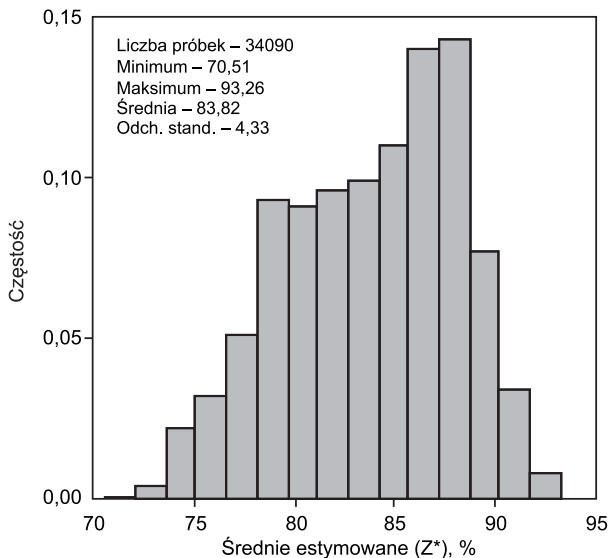




Rys. 3. Histogram rozkładu średnich estymowanych ( $Z^*$ ) wilgotności popiołożużli (W)

Fig. 3. Histogram showing the distribution of estimated averages ( $Z^*$ ) for the moisture content (W) of the ash-slugs

Histogram rozkładu średnich ( $Z^*$ ) zawartości popiołu cechował się wyraźną skośnością ujemną (rys. 4) o współczynnikiem  $g_1$  osiągniętą wartość  $-0,32$ . Analogiczna tendencja do asymetrii lewostronnej wystąpiła również na histogramie obliczonym na podstawie danych oryginalnych zawartości  $A_0$ .



Rys. 4. Histogram rozkładu średnich estymowanych ( $Z^*$ ) zawartości popiołu ( $A_0$ ) w popiołożużlach

Fig. 4. Histogram showing the distribution of estimated averages ( $Z^*$ ) for the ash content ( $A_0$ ) of the ash-slugs

Współczynnik zmienności (V) średnich estymowanych ( $Z^*$ ) zawartości  $A_0$  wskazywał na bardzo małe zróżnicowanie wartości tego parametru (tab. 5). Większą wartość współczynnika V (na granicy małej i przeciętnej zmienności) uzyskano w przypadku standardowego odchylenia estymacji ( $\sigma_k$ ). Zmiany średnich ( $Z^*$ ) wzbogacalności ( $e^*$ ) (w mniejszym stopniu zawartości węgla organicznego) były silniejsze [10, 13], w porównaniu do stwierdzonego bardzo małego zróżnicowania średnich zawartości popiołu ( $A_0$ ) i małej zmienności wilgotności (W) popiołożużli.

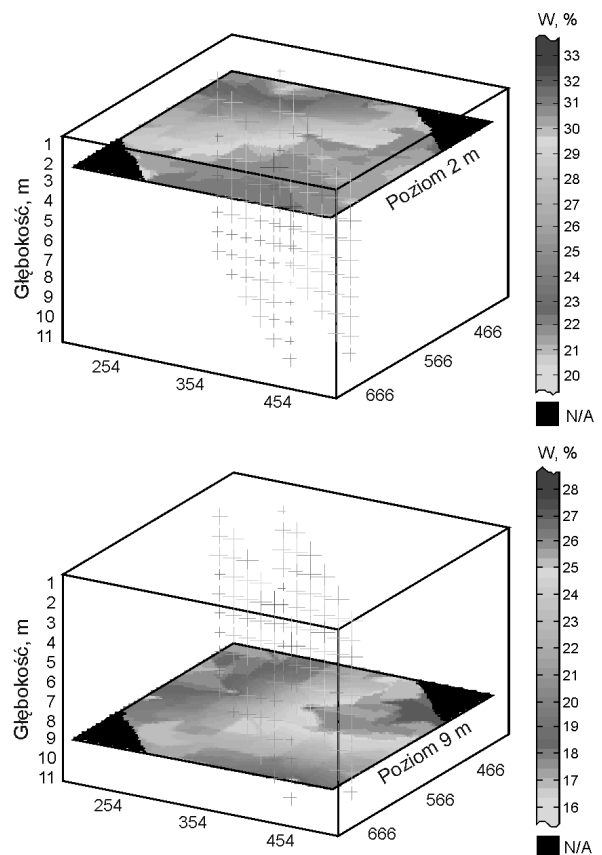
Tabela 5. Statystyki wartości parametrów geostatystycznych zawartości popiołu w popiołożużlach ( $A_0$ ) w węzłach przestrzennej siatki elementarnej (kriging zwyczajny blokowy, liczba węzłów sieciowych 34090)  
Table 5. Statistics of geostatistical parameters of ash content in ash-slugs ( $A_0$ ) in the nodes of 3D elementary grid (ordinary block kriging; number of grid nodes, 34,090)

Parametr	$X_{\min}$ %	$X_{\max}$ %	$X$ %	S %	V %
$Z^*$	70,51	93,26	83,82	4,33	5,00
$\sigma_k$	2,26	11,78	7,67	7,41	19,00

### Wizualizacja przestrzenna wyników estymacji

Mapy rastrowe rozkładów średnich estymowanych ( $Z^*$ ) i wartości standardowych odchyłeń estymacji ( $\sigma_k$ ) parametrów technologicznych popiołożużli umożliwiają szczegółowe prześledzenie zmian ich wartości na obszarze składowiska odpadów (zbiornik A), a także w kierunku przesuwania się od warstw najpłycej zalegających do najgłębszych warstw składowiska [10, 13]. Obrazy rastrowe zmienności pozwalają również na zorientowanie się, czy istnieje korelacja przestrzenna pomiędzy wartościami tych parametrów. Mapy rastrowe rozkładów średnich estymowanych ( $Z^*$ ) wilgotności popiołożużli (W) w rzucie perspektywicznym zamieszczono na rysunku 5.

Na mapie rastrowej dotyczącej głębokości 2 m zaznaczyły się dwa podobszary o zróżnicowanych wartościach wilgotności popiołożużli, przebiegające wzdłuż przekątnej analizowanego obszaru. Jeden podobszar reprezentował mniejsze ( $19,86 \div 27,29\%$ ) i pośrednie wartości wilgotności ( $28,03 \div 28,78\%$ ), zaś drugi podobszar, o większej



Rys. 5. Mapa rastrowa rozkładu średnich estymowanych ( $Z^*$ ) wilgotności popiołożużli (W) (w rzucie perspektywicznym)

Fig. 5. Raster map showing the distribution of estimated averages ( $Z^*$ ) for the moisture content (W) of the ash-slugs (perspective view)

powierzchni, cechował się większymi wartościami wilgotności (29,52÷31,75%). Widoczne też było małe centrum o najmniejszej wilgotności, o tej samej lokalizacji przestrzennej. Na mapie rastrowej dotyczącej głębokości 9 m wyraźniej zarysowany był podobszar o największej średniej wilgotności, stanowiący jednolitą dużą powierzchnię. Największe średnie ( $Z^*$ ) obejmowały zakres wartości 25,04÷27,16%, natomiast mniejsze wilgotności zawierały się w przedziałach 15,89÷20,12% i 20,12÷22,93%.

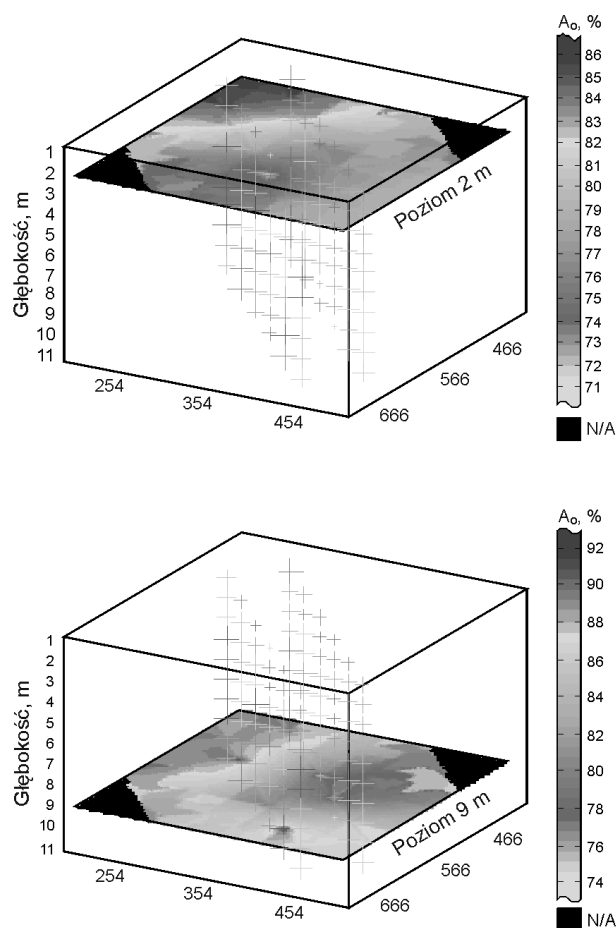
Dolne granice zakresów maksymalnych średnich estymowanych ( $Z^*$ ) wilgotności popiołożużli systematycznie zmniejszały się, przesuując się w przedziale głębokości 1÷10 m (rys. 5), natomiast górne granice średnich utrzymywały się na zbliżonym poziomie do głębokości 6 m, a następnie wyraźnie zmniejszały się w przedziale 6÷10 m. W przypadku dolnych granic minimalnych średnich wartości estymowanych ( $Z^*$ ) parametru W można stwierdzić, iż jego wartości zwiększały się do głębokości 4 m, po czym nastąpiło ich zmniejszanie się, jednakże z pewnymi wahaniami. Poczynając od głębokości 8 m ponownie zwiększyły się minimalne wartości średnie  $Z^*$  (zarówno granice dolne, jak i górne).

Mapy rastrowe rozkładów średnich estymowanych ( $Z^*$ ) zawartości popiołu ( $A_0$ ) w popiołożużlach w rzucie perspektywicznym pokazano na rysunku 6. Podobszary cechujące się znacznie większą zawartością popiołu w popiołożużlach zajmowały większą powierzchnię na mapach rastrowych, osiągając wartości  $A_0$  w zakresie 83,11÷85,89% na głębokości 2 m oraz 88,10÷91,33% na głębokości 9 m. Na mapie średnich wartości  $A_0$ , dotyczącej głębokości 2 m, rozciągał się podobszar o mniejszej zawartości popiołu (69,80÷74,08% i 71,07÷74,78%), z pojedynczym małym centrum o najmniejszej wartości  $A_0$ . Wartość  $A_0$  zwiększała się w kierunku głębszych warstw popiołożużli, zaś wyraźne centrum o większej wartości  $A_0$  można było obserwować m.in. na głębokości 9 m (88,10÷91,33%).

Strefom o zwiększonej zawartości węgla organicznego i o podwyższonej wzbogacalności odpowiadały centra o obniżonej zawartości popiołu i odwrotnie [10, 13]. Większą wilgotność popiołożużli stwierdzono w miejscach cechujących się większą zawartością węgla organicznego i wzbogacalnością. Podobszary o zmniejszonej zawartości węgla organicznego związane były z podobszarami charakteryzującymi się większą zawartością popiołu.

Zakresy maksymalnych średnich  $Z^*$  zawartości popiołu w popiołożużlach wyraźnie zwiększały się wraz z przesuwaniami się w przedziale 1÷10 m (rys. 6). Maksymalne średnie  $Z^*$  osiągały większe wartości w głębszych warstwach składowiska, przy czym były one nieco mniejsze na głębokości 8 m, utrzymując się na zbliżonym poziomie już na głębokości 10 m. Spostrzeżenie to dotyczyło też zakresów minimalnych średnich  $Z^*$ . Zawartość  $A_0$  osiągała wyraźnie mniejsze wartości na głębokości 9÷10 m.

Zmienność trzech parametrów dotyczących zbiornika A, tj. zawartości węgla organicznego (C), wzbogacalności ( $e'$ ) [10, 13] i wilgotności (W) wykazała określoną prawidłowość. Maksymalne średnie  $Z^*$  i na ogół minimalne średnie  $Z^*$ , a szczególnie ich górne granice zmniejszały się systematycznie wraz z głębokością składowiska. Tymczasem zakresy maksymalnych średnich  $Z^*$  zawartości popiołu  $A_0$  zwiększały się systematycznie, osiągając większe wartości  $Z^*$  w głębszych warstwach popiołożużli. Największe średnie  $Z^*$  zawartości węgla organicznego i wzbogacalności cechowały powierzchniowe (1÷2 m) i przypowierzchniowe (3÷4 m) warstwy analizowanego



Rys. 6. Mapa rastrowa rozkładu średnich estymowanych ( $Z^*$ ) zawartości popiołu ( $A_0$ ) w popiołożużlach (w rzucie perspektywicznym)

Fig. 6. Raster map showing the distribution of estimated averages ( $Z^*$ ) for the ash content ( $A_0$ ) of the ash-slugs (perspective view)

składowiska odpadów [10, 13]. Wyraźnie mniejsze średnie  $Z^*$  uzyskano w przypadku głębiej zalegających warstw, w przedziale 5÷8 m. Najmniejszą zawartość węgla organicznego i wzbogacalność stwierdzono w najgłębiej zalegających warstwach, tj. w przedziale 9÷10 m.

Niewielkie wartości współczynnika zmienności (V) średnich estymowanych ( $Z^*$ ) wilgotności (V=16%) i zawartości popiołu (V=5%) wskazywały na zróżnicowane zachowanie tych parametrów, tj. większe zmiany pierwszego parametru. Takim oszacowaniem średnich  $Z^*$  towarzyszyły stosunkowo nieduże wartości współczynników V standardowego odchylenia estymacji ( $\sigma_k=16\div19\%$ ), co może świadczyć o wiarygodności uzyskanych ocen krigingowych. Należy zauważyć, że warstwy popiołożużli zbiornika A, wykazujące największą wzbogacalność, mogą stanowić przedmiot zainteresowania i wykorzystania przez określone sektory gospodarki (górnictwo, ochrona środowiska, energetyka).

## Podsumowanie

Opracowano model geostatystyczny (3D) zmienności parametrów technologicznych popiołożużli wypełniających składowisko odpadów (zbiornik A) pochodzących z przemysłu energetycznego. Podstawę zaproponowanego modelu stanowiły funkcja wariogramu kierunkowego oraz

kriging zwyczajny (blokowy). Ich zastosowanie umożliwiło oszacowanie wartości analizowanych parametrów, zarówno w rozprzestrzenieniu poziomym odpadów, jak i wraz z głębokością zalegania warstw w składowisku. Możliwe więc będzie stworzenie pełnej dokumentacji obrazów stwierdzonej zmienności w postaci map rastrowych, izolinowych, blokdiagramów itp. rozkładów średnich estymowanych ( $Z^*$ ) i standardowego odchylenia estymacji ( $\sigma_k$ ), a także innych parametrów charakteryzujących skuteczność wykonanych estymacji.

Zastosowanie metod geostatystycznych do opisu zmienności parametrów technologicznych odpadów – traktowanych jako złoża antropogeniczne, pozwoliło pozyskać zbiór cennych informacji, zarówno z poznawczego (metodycznego), jak i praktycznego punktu widzenia. Te istotne dane mogą okazać się bardzo przydatne przy ewentualnym podjęciu prac nad gospodarczym wykorzystaniem materiału zdeponowanego na składowisku popiołożużli.

Przedstawiona metodyka badawcza ma charakter uniwersalny i może znaleźć zastosowanie w rozwiązywaniu różnorodnych zagadnień, m.in. geologiczno-górnicych, energetycznych oraz w ochronie środowiska do oszacowania zawartości metali ciężkich, substancji toksycznych i szkodliwych w gruntach i wodach podziemnych, podczas sporządzania charakterystyk przestrzennych terenów poddawanych rewitalizacji i podejmowaniu decyzji dotyczących remediacji terenów zanieczyszczonych, a wreszcie w klimatologii do prognozowania wartości parametrów klimatycznych i środowiskowych, np. wysokości opadów atmosferycznych i zawartych w nich związków chemicznych, wynikających z określonych uwarunkowań środowiska naturalnego.

*Badania geostatystyczne zmienności parametrów technologicznych popiołożużli zostały wykonane w ramach współpracy Autorki z Instytutem Metali Nieżelaznych w Gliwicach, w ramach projektu IT I (KB/140/12504/IT1-B/U/08), pt. „Opracowanie technologii utylizacji popiołożużli ze składowisk poprzez wydzielenie węgla metodą flotacji pianowej”. Projekt Inicjatywa Technologiczna I, sprawozdanie IMN 6656/1–12/09, Gliwice 2009.*

## LITERATURA

1. M. ARMSTRONG: Basic Linear Geostatistics. Springer, Berlin 1998, p. 153.
2. E.H. ISAACS, R.M. SRIVASTAVA: An Introduction to Applied Geostatistics. OUP, New York 1989, p. 561.
3. J. ŁOMOTOWSKI, J. SKWAREK: Zastosowanie metod geostatystycznych do analizy zmienności składu wody w systemach wodociągowych. *Ochrona Środowiska* 2003, vol. 25, nr 4, ss. 61–64.
4. B. NAMYSŁOWSKA-WILCZYŃSKA, K. RUSAK: Geostatistics description of heavy metal content variation in soil of Olkusz region against a background of geological structure by GIS method. *Mathematische Geologie* 2003, Vol. 7, pp. 51–63.
5. B. NAMYSŁOWSKA-WILCZYŃSKA, J. PYRA: Analiza przestrzenna zawartości miedzi w środowisku gruntowo-wodnym Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego. *Roczniki Geomatyki* 2005, t. III, z. 4, ss. 137–147.
6. B. NAMYSŁOWSKA-WILCZYŃSKA: Geostatystyka – teoria i zastosowania. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2006, s. 356.
7. B. NAMYSŁOWSKA-WILCZYŃSKA: Analizy przestrzenne z zastosowaniem metod geostatystycznych. Modelowanie 3D porfirowego złoża miedzi Rio Blanco w Peru. *Roczniki Geomatyki* 2007, t. V, z. 1, pp. 91–103.
8. B. NAMYSŁOWSKA-WILCZYŃSKA [red]: Modelowanie procesów hydrologicznych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008, s. 526.
9. B. NAMYSŁOWSKA-WILCZYŃSKA: 3D geostatistical modelling of parameters of Rio Blanco porphyritic copper deposit in Peru. Proc. Primer Seminario Internacional de Geologia para la Industria Minera, Antofagasta (Chile) 2009, pp. 301–325.
10. B. NAMYSŁOWSKA-WILCZYŃSKA, B. SKORUPSKA, A. WIENIEWSKI: Application of geostatistical methods to describe variation in technological parameters of ash-slugs. Proc. of Linnaeus ECO-TECH, Kalmar (Sweden) 2010, pp. 607–618.
11. B. NAMYSŁOWSKA-WILCZYŃSKA, A. WILCZYŃSKI: Badania geostatystyczne zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi w wybranych rejonach Górnego Śląska. *Ochrona Środowiska* 1997, vol. 19, nr 2, ss. 9–18.
12. B. NAMYSŁOWSKA-WILCZYŃSKA, A. WILCZYŃSKI: 3D electrical power demand forecasting as tool for planning electrical power firm's activity by means of geostatistical methods. Uniwersytet Ekonomiczny, Zeszyt Prac Naukowych nr 91 „Ekonometria 28. Forecasting”, Wrocław 2010, pp. 95–112.
13. B. NAMYSŁOWSKA-WILCZYŃSKA, B. SKORUPSKA, A. WIENIEWSKI: Analiza przestrzenna wzbogacalności popiołożużli z wykorzystaniem metod geostatystycznych. *Górnictwo i Geoinżynieria* 2011, vol. 35, z. 2, ss. 451–461.
14. H. WACKERNAGEL: Multivariate Geostatistics, An Introduction with Applications. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1998, p. 291.

**Namysłowska-Wilczyńska, B., Skorupska, B., Wieniewski, A. Geostatistical Analysis of Variation in Technological Parameters of Ash-slugs Disposed of on an Industrial Waste Disposal Site: A Case Study. *Ochrona Środowiska* 2012, Vol. 34, No. 2, pp. 43–48.**

**Abstract:** The object under study is an industrial waste disposal site located in the proximity of Swiecie (district Województwo Kujawsko-Pomorskie), which receives ash-slugs from power generation. Geostatistical analysis was carried out for some part of this waste disposal site (Tank A). Two technological parameters of the ash-slugs were made subject to analysis of spatial variation: ash content and moisture content. Structural analysis of variation in the two parameters was conducted using the directional variogram function, and was followed by estimation of average values

( $Z^*$ ) using ordinary (block) kriging (3D). A geostatistical model (3D) was established, which describes variations in the technological parameters of the waste disposal site, thus visualizing the spatial variation of their values in the horizontal and vertical extension of the ash-slag layers. It has been demonstrated that the use of geostatistical methods for describing the technological parameters of the ash-slugs (treated as an anthropogenic deposit) offers the possibility of building up a comprehensive database that provides complete input information for a research project on the utilization of the material being disposed of.

**Keywords:** Ash-slugs, moisture content, ash content, spatial analysis, variation, geostatistical methods, directional variogram, ordinary kriging.