

TOMASZ BARTUŚ*, TADEUSZ SŁOMKA**

Geostatystyczna estymacja parametrów jakości węgla brunatnego w polu Belchatów wykorzystująca znajomość zmienności lokalnej

Wprowadzenie

Złoże Belchatów jest największym polskim złożem węgla brunatnego. W związku z tym, że węgiel brunatny z Belchatowa zużywany jest głównie do celów energetycznych, wśród licznych jego właściwości, parametrów i wskaźników, których jest około 100 (PN-91/G-04510), najważniejszymi są te, które decydują o jego przydatności energetycznej. Największe znaczenie spośród nich mają parametry w stanie roboczym: zawartość wilgoci całkowitej (W_t^r), zawartość popiołu (A^r), obliczana na podstawie ciepła spalania – wartość opałowa (Q_t^r) oraz zawartość siarki całkowitej (S_t^r).

Jednym z podstawowych zadań geologiczno-górnictwej obsługi kopalni jest obliczanie zasobów kopaliny oraz prognozowanie parametrów węgla w blokach eksploatacyjnych w celu dostosowania parametrów surowca do wymogów stawianych przez odbiorców (Naworyta 2008). W praktyce istnieje cały szereg metod wykorzystywanych do tych celów (Nieć 1990; Mucha 1991, 1994; Ciepłiński, Uberman 1995; Namysłowska-Wilczyńska 2006). Ocen takich dokonuje się najczęściej opierając się na analizie danych pochodzących z prób bruzdowych pobieranych z rdzeni otworów wiertniczych, odsłoneń na powierzchni odkrywek lub z wyrobisk górniczych. Dane pochodzące z tak utworzonej sieci opróbowania, w zależności od jej gęstości, w lepszym lub gorszym stopniu odzwierciedlają regionalną zmienność parametrów złożowych. Rutynowo, w praktyce geologicznej nie bada się zmienności lokalnej parametrów kopaliny. Ich estymację w dowolnym miejscu złoża, dokonuje się na bazie założenia o niewielkiej zmienności parametrów w małej skali w stosunku do

* Dr inż., ** Prof. dr hab. inż., Katedra Geologii Ogólnej, Ochrony Środowiska i Geoturystyki AGH, Kraków.

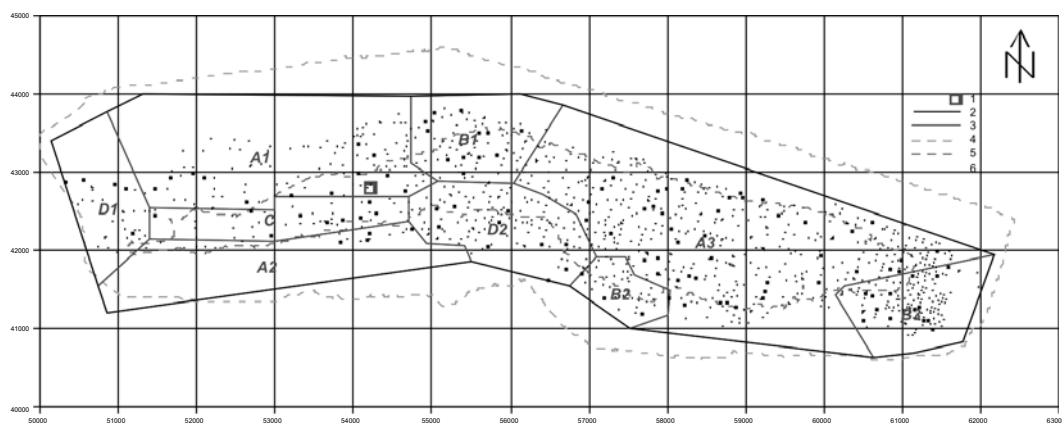
zmienności regionalnej. Powstaje jednak pytanie o wartość tak sporządzanych ocen w przypadku, gdy zmienność parametrów obserwowana w skali mniejszej od średniej gęstości sieci opróbowania, nazywana w opracowaniu zmiennością lokalną, okaże się być wyższa od zmienności regionalnej.

Celem artykułu było podsumowanie statystycznych i geostatystycznych analiz lokalnej, horyzontalnej zmienności podstawowych parametrów technologiczno-chemicznych węgla brunatnego z wybranego fragmentu pola Bełchatów i próba odpowiedzi na pytanie czy i ewentualnie w jaki sposób można poprawić jakość geostatystycznego szacowania tych parametrów posiadając informację o ich zmienności lokalnej.

1. Obszar badawczy

Do analiz lokalnej zmienności parametrów węgla wybrano fragment pokładu głównego (pokład D) (Czarnecki i in. 1992; Matl 2000), położonego w środkowej części pola Bełchatów (centralna część złoża Bełchatów). Cały obszar opróbowania leżał w obrębie stropu pokładu głównego, pomiędzy poziomami paratonsteinów TS-5 i TS-4 (Wagner 2000), w obrębie silnie zaburzonej strefy północnej krawędzi rowu drugiego rzędu (Kasiński 1984; Wysokiński, Zapasnik 1984; Gotowała 1994; Hałuszczak 1994; Gotowała, Hałuszczak 1999) (rys. 1).

W celu dokładnego wyznaczenia miejsca opróbowania, z zastosowaniem dalmierza laserowego, odbiornika GPS i taśmy mierniczej, wyznaczono sznurową sieć kwadratową o długości boku 8 na 8 m (rys. 2). W dalszej części rozważań sieć opróbowania będzie



Rys. 1. Rozmieszczenie otworów wiertniczych w polu Bełchatów

- 1 – lokalizacja pola doświadczalnego, 2 – granica obszaru badań, 3 – obszary o podobnych warunkach sedymentacji osadów głównego pokładu węgla, 4 – górna krawędź odkrywki, 5 – dolna krawędź odkrywki (2002), 6 – otwory wiertnicze

Fig. 1. Distribution of boreholes in the Bełchatów area

- 1 – location of the experimental area, 2 – border of the research area, 3 – areas with the similar sedimentation conditions in the main seam of the lignite complex, 4 – upper scarp of the mine, 5 – lower scarp of the mine (2002), 6 – boreholes

nazywana polem doświadczalnym. Rzędna pionowa miejsca opróbowania wynosiła około 36 m n.p.m. Orientacja pola doświadczalnego jest zrotowana w stosunku do lokalnego układu odniesienia KWB Bełchatów. Podzielono je na 64 równe pola. Każda z części miała powierzchnię 1 m². Pobierano po jednej próbie z każdego pola (łącznie 64 próby). Masa każdej próby była w przybliżeniu jednakowa i wynosiła około 4 kg. Szczegółową procedurę opróbowania przedstawiono w pracy (Bartuś 2007).



Rys. 2. Opróbowanie pola doświadczalnego. Pole Bełchatów

Fig. 2. Sampling of the experimental area. Bełchatów area

2. Metodyka

Geostatystyczna estymacja różnorodnych parametrów środowiskowych mających znamiona zmiennych zregionalizowanych opiera się na analizie przestrzennych struktur zmienności tych parametrów. Narzędziem opisującym zmienne zregionalizowane jest funkcja semiwariogramu stanowiąca model zmienności. Wyznacza się ją w oparciu o tzw. semiwariogramy empiryczne obliczane na podstawie punktowych realizacji zmiennej zregionalizowanej w badanym obszarze.

Do wyznaczenia wiarygodnych wartości semiwariogramów empirycznych wymagana jest odpowiednia ilość par punktów opróbowania oddalonych od siebie o te same przedziały odległości. Ich ilość nie powinna być niższa od 30–50 par. Z tych powodów, w praktyce, wiarygodne wartości semiwariogramów uzyskuje się dla zakresów odległości większych od minimalnej i mniejszych od połowy maksymalnej odległości pomiędzy parami punktów opróbowania (Kokesz, Mucha 1983; Mucha 1994, 2001). W przypadku opisywanych niżej analiz, po weryfikacji otworów wiertniczych, mającej na celu wybór najbardziej wiarygodnych danych,

gęstość sieci rozpoznawczej uległa rozrzedzeniu, osiągając w różnych częściach pola Bełchatów od 30 do 220 otworów przypadających na 1 km². Spowodowało to automatycznie wzrost minimalnej odległości pomiędzy otworami wiertniczymi, wyznaczającej wiarygodny przebieg semiwariogramów empirycznych do około 80–100 m (rys. 1). Powstał typowy problem opisu struktur zmienności badanych parametrów w przedziale odległości od 0 do około 100 m pomiędzy miejscami opróbowania (Kokesz, Mucha 1983; Mucha 1988, 2001).

Do opisu semiwariogramów empirycznych za pomocą modeli geostatystycznych stosuje się zestaw dozwolonych funkcji geostatystycznych. Aby w możliwie najlepszy sposób estymować wartości analizowanych parametrów złożowych w dowolnym punkcie lub bloku złoża staramy się, aby wspomniane modele w jak najlepszy sposób opisywały semiwariogramy empiryczne (Kokesz, Mucha 1983; Mucha 1991, 1994; Namysłowska-Wilczyńska 2006).

W przypadku niewielkich zakresów odległości pomiędzy punktami opróbowania zmiennych ciągłych ($h \rightarrow 0$), wartości semiwariogramów rozumianych jako miary zmienności badanej cechy pomiędzy tymi punktami powinny zmierzać do 0.

$$\gamma_{(h \rightarrow 0)} \rightarrow 0$$

W semiwariogramach empirycznych opisujących zmienne ciągłe obserwuje się jednak pewien początkowy, niezerowy poziom zmienności analizowanych parametrów. Wartość przecięcia osi rzędnych przez model aproksymujący semiwariogram empiryczny stanowi jego wyraz wolny (C_0). Wartość ta nazywana w literaturze efektem samorodków, charakteryzuje lokalny poziom zróżnicowania badanego parametru i określa składową losową zmienności całkowitej. Efekt ten może być związany z obecnością w złożu mikrostruktur, a także sumaryczną wariancją szeroko rozumianych błędów opróbowania i analiz laboratoryjnych (Kokesz, Mucha 1983).

$$C_0 = \lim_{h \rightarrow 0} \gamma(h)$$

Modelowania w zakresie mniejszych odległości pomiędzy miejscami opróbowania, dokonuje się najczęściej w sposób arbitralny przez graficzną lub automatyczną ekstrapolację funkcji semiwariogramów, opierając się na ocenie najbardziej prawdopodobnego ich przebiegu. Opisywane podejście skutkuje najczęściej niewłaściwym doбором modelu zmienności i przeszacowaniem wariancji w zakresie małych odległości pomiędzy próbami (Mucha 2001). Przedstawiana praca stanowi metodyczną i praktyczną próbę rozwiązania tego problemu na przykładzie wybranych fragmentów złoża Bełchatów.

Wszelkie analizy geostatystyczne przeprowadzono według tej samej procedury. Badano semiwariogramy empiryczne bezwzględne izotropowe i kierunkowe oraz izotropowe relatywne. Wszystkie semiwariogramy zmienności lokalnej obliczane były dla zasięgu obserwacji 7,5 m, a semiwariogramy zmienności regionalnej do 1700 m. W trakcie regionalnego modelowania zmienności parametrów węgla wykorzystującego informację o zmienności lokalnej, w celu ułatwienia ekstrapolacji modeli, zasięgi modelowanych semiwariogramów ograniczono do 200 m.

Dla zawartości wilgoci całkowitej, wartości opałowej i zawartości siarki całkowitej obliczeń semiwariogramów próbkowych dokonywano z pomocą klasycznego wzoru G. Matherona (Mucha 1994; Namysłowska-Wilczyńska 2006). W przypadku zawartość popiołu, w związku z jego wyraźnie dodatnio asymetrycznym rozkładem (Bartuś 2007), zastosowano odmienny estymator semiwariogramu, określany w literaturze jako semiwariogram „Inv – Cov” (*Inverted Covariance*), który ogranicza niekorzystny wpływ nieujemnych z reguły, anomalnych wartości populacji próby (Mucha 1994, 2001).

Do semiwariogramów próbkowych dobierano metodą graficzną geostatystyczne modele. Parametry modeli dobierano metodą prób i błędów, każdorazowo oceniając wizualnie jakość dopasowania i korygując postać modelu teoretycznego. Poprawność doboru modeli testowano z zastosowaniem testu krzyżowego (*cross – validation*). Do oceny poprawności estymacji parametrów w punktach opróbowania wykorzystywano maksymalnie osiem punktów w sektorze. Średnie, względne błędy ocen wartości parametrów w punktach opróbowania ($\bar{\varepsilon}$), dokonane metodą zwyczajnego krigingu punktowego (*ordinary point kriging*) powinny mieścić się w przedziale $0 \pm 0,05$ (Mucha 1991; Armstrong 1998), natomiast odchylenia standardowe błędów ocen (σ_{ε}) nie powinny wykraczać poza przedział 0,9–1,1 (Armstrong 1998). Poza testami krzyżowymi, miarą dopasowania geostatystycznych modeli były wyniki korelacji liniowej pomiędzy ocenami wartości parametrów w punktach opróbowania oraz rzeczywistymi wartościami tych parametrów.

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|z_i^* - z_i|}{\delta_k}$$

- z_i – wartość badanego parametru w i -tym punkcie sieci opróbowania,
- z_i^* – wyestymowana wartość parametru w i -tym punkcie sieci opróbowania,
- δ_k – odchylenie standardowe estymacji.

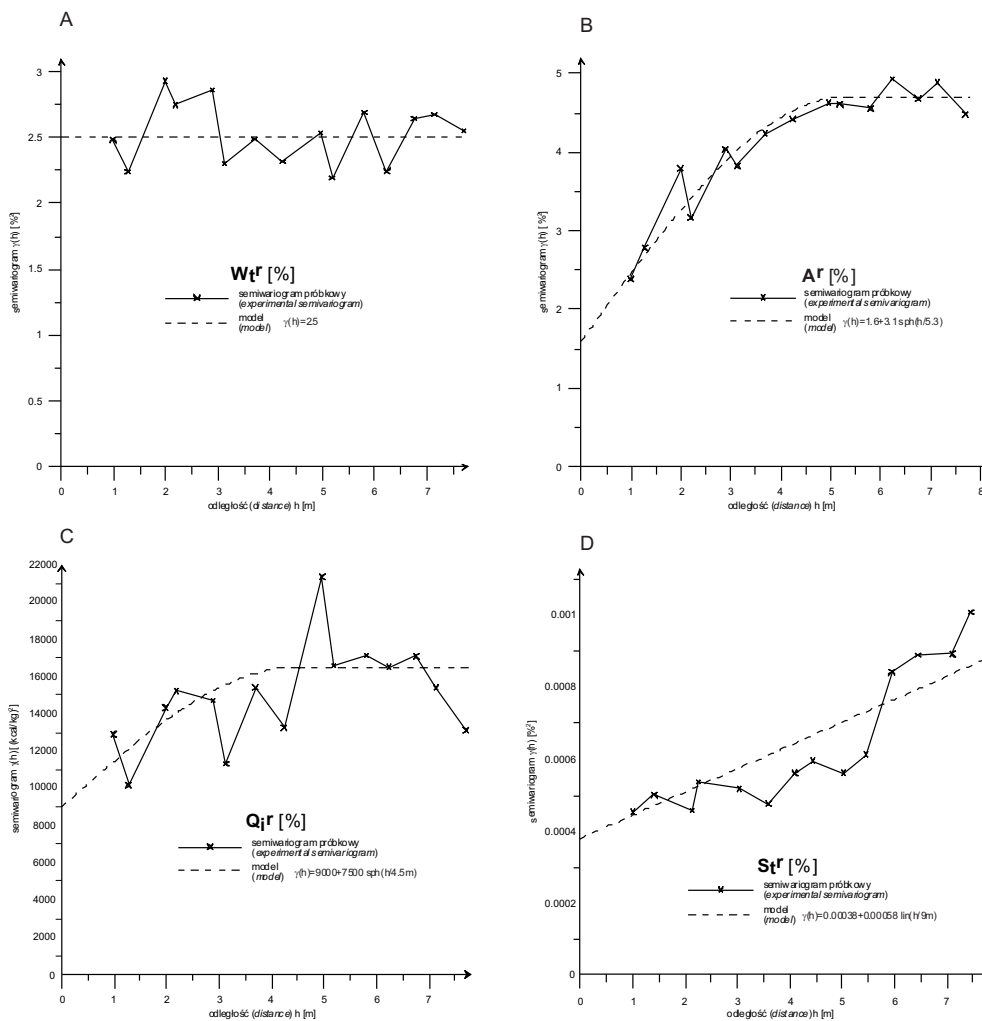
Po dopasowaniu satysfakcjonujących modeli geostatystycznych, obliczano udziały składników nielosowych w całkowitej zmienności parametru złożowego (U_N).

W pierwszej części badań skupiono się na geostatystycznej analizie zmienności lokalnej badanych parametrów w polu doświadczalnym. Analiza stanowiła uzupełnienie badań przeprowadzonych wcześniej z zastosowaniem metod statystyki klasycznej (Bartuś 2005, 2007).

Kolejnym krokiem było pobranie z bazy danych otworów wiertniczych KWB Bełchatów (JBDG, stopień aktualności: 2002) regionalnej populacji porównawczej. Opierano się na wyznaczonych wcześniej homogenicznych obszarach o podobnych warunkach sedymentacji węgla w pokładzie głównym (Bartuś 2005). W związku z położeniem pola doświadczalnego dokładnie na granicy obszarów A1 – N obszar o sedymentacji fitogenicznej i C – rów drugiego rzędu (obszar o sedymentacji fitogenicznej ze wzmożoną subsydencją) (rys. 1), w dalszych analizach brano pod uwagę oba wymienione obszary. Do badań zakwalifikowano otwory złożowe zagęszczające rozpoznane i złożowe dokumentacyjne w łącznej liczbie 454.

W związku z położeniem pola doświadczalnego na wys. około 36 m n.p.m., dla wyeliminowania wpływu zmienności pionowej parametrów (wzdłuż osi otworów wiertniczych), zaszła konieczność pobrania do analiz prób węgla wyłącznie z tego horyzontu. Zostały one obliczone jako średnie ważone miąższością prób bruzdowych, których spąg leżał na wysokości min. 33 m n.p.m., a strop na wysokości maks. 39 m n.p.m.

Procedura modelowania wykorzystującego informację na temat zmienności lokalnej polegała na połączeniu empirycznych, bezwzględnych, poziomych semiwariogramów zmienności lokalnej (rys. 3) i regionalnej (rys. 5) osobno dla obszarów A1 i C oraz dopasowaniu do



Rys. 3. Semiwariogramy bezwzględne, izotropowe wilgoci całkowitej (A), zawartości popiołu (B), wartości opałowej (C) i zawartości siarki całkowitej (D) w polu doświadczalnym (pole Bełchatów).

Fig. 3. Omnidirectional semiwariograms of the total moisture (A), ash content (B), calorific value (C) and sulfur content (D) from the experimental area (Bełchatów area)

nich modeli geostatystycznych. Modelowano w taki sposób, aby dla odległości przekraczających 200 m pomiędzy otworami wiertniczymi, nowe modele (rys. 6) najlepiej dopasować do modeli zmienności regionalnej (rys. 5). Umożliwiło to porównanie efektów podejścia klasycznego (bez uwzględnienia informacji lokalnej) i modelowania eksperymentalnego (uwzględniającego tę informację).

Ekstrapolacji modeli w zakresach odległości od 0–120 m dokonywano metodą graficzną w taki sposób, aby wykres dopasować do najbardziej wiarygodnych punktów semiwariogramów empirycznych. Za punkty o wyższym poziomie wiarygodności uznawano te, które zostały obliczone z większej ilości par punktów sieci rozpoznawczej. W związku z ubogą ilością danych we wspomnianym zakresie odległości pomiędzy obserwacjami, ekstrapolacja stawała się swoistym kompromisem pomiędzy empirycznymi semiwariogramami w zakresie odległości 0–120 m, a modelami horyzontalnej zmienności regionalnej.

4. Wyniki

Już wstępna analiza danych z pola doświadczalnego, przeprowadzona z zastosowaniem metod statystyki klasycznej, wykazała wyraźne podobieństwo średnich wartości parametrów do wyników podawanych przez KWB Bełchatów dla całego pola Bełchatów (Bartuś 2007).

Z uwagi na rozważane zagadnienie, na większą uwagę zasługują bardzo niskie wartości współczynników zmienności parametrów węgla. W przypadku W_t^r jego wartość wynosiła 3%, a dla Q_i^r – 6%. Nieznacznie wyższą wartość tego współczynnika obserwowano dla S_t^r – 12%. Najwyższym współczynnikiem zmienności cechowała się A^r – 42%.

Na podstawie porównań zamieszczonych powyżej wartości ze znanymi z literatury (Słomka i in. 2002, 2003; Bartuś 2005) poziomami zmienności tych samych parametrów dla całości pola Bełchatów, należy stwierdzić, że współczynniki lokalnej zmienności parametrów węgla – w przypadku wartości opałowej i zawartości siarki całkowitej – osiągały znacznie niższe wartości niż w przypadku zmienności generalnej. Inaczej sprawa wyglądała w przypadku dwóch pozostałych parametrów węgla. Lokalne zmienności zawartości wilgoci i zawartości popiołu osiągały, a nawet nieznacznie przekraczały poziom charakterystyczny dla całego pola Bełchatów. W związku z takim wynikiem analizy, regionalna estymacja zawartości wilgoci i zawartości popiołu może być więc obciążona znacznymi błędami.

Rozkłady analizowanych parametrów węgla należały do dwóch typów: symetrycznych – zbliżonych do normalnego (W_t^r , Q_i^r , S_t^r), oraz logarytmiczno – normalnych – prawo skośnych (A^r). We wszystkich przypadkach wyraźnie dominowały klasy modalne. Przeprowadzone analizy dowiodły, że w przypadku parametrów: W_t^r , A^r i Q_i^r , na przyjętym poziomie istotności ($\alpha = 0,05$), nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej o zgodności rozkładów empirycznych z opisywanymi rozkładami teoretycznymi. W przypadku rozkładu S_t^r , test χ^2 zgodności rozkładu z rozkładem normalnym dał powody do odrzucenia hipotezy zerowej. Dodatkowa analiza zgodności rozkładów wykorzystująca ciągły test Kołmogorowa

Smirnowa, właściwszy dla populacji o niewielkiej liczebności prób pozwoliła jednak na jej przyjęcie (Bartuś 2007).

Przeprowadzone analizy w pełni potwierdziły znane z literatury (Słomka i in. 2002, 2003; Bartuś 2005) cechy rozkładów badanych parametrów węgla w polu Belchatów.

4.1. Geostatystyczne modelowanie lokalnej, poziomej zmienności parametrów jakości węgla w polu doświadczalnym

Geostatystyczne analizy lokalnej poziomej zmienności parametrów jakości węgla z pola doświadczalnego, pozwoliły stwierdzić, że spośród badanych parametrów węgla tylko zawartość wilgoci całkowitej charakteryzowała się wyłącznie zmiennością losową. Potwierdziły to analizy izotropowe i anizotropowe.

Geostatystyczna analiza anizotropowa wykazała zróżnicowanie zmienności badanych parametrów w funkcji kierunku obserwacji. Jednak z uwagi na brak istotnych różnic współczynników korelacji liniowej Pearsona, wartości wyestymowanych za pomocą krigingu oraz wartości obserwowanych w punktach opróbowania stwierdzono, że semiwariogramy izotropowe w wystarczająco dobrym stopniu opisują struktury zmienności badanych parametrów. Do geostatystycznego opisu tych struktur stosowano modele sferyczne (A^r , Q_i^r) oraz model liniowy (S_t^r). W związku z brakiem wzrostu wartości semiwariogramu w przypadku zawartości wilgoci całkowitej, aproksymowano go modelem losowym (rys. 3).

W przypadku semiwariogramów sferycznych (A^r , Q_i^r) uzyskano podobny zasięg autokorelacji wynoszący od 4,5–5,5 m. W modelu liniowym (S_t^r) nie osiągnięto progu autokorelacji.

Modele geostatystyczne dobrze opisywały struktury zmienności analizowanych parametrów. Świadczyły o tym pozytywne wyniki wszystkich przeprowadzonych testów krzyżowych (tab. 1).

Punkty przecięcia przez semiwariogramy bezwzględne, izotropowe osi rzędnych, wyznaczyły początkowe poziomy zmienności analizowanych parametrów węgla. Pozwoliło to na szacunkowe określenie maksymalnego, łącznego poziomu błędów opróbowania, przygotowania prób do analiz oraz błędów analiz laboratoryjnych przeprowadzonych przez laboratorium KWB Belchatów. Wariancje poszczególnych błędów wynosiły odpowiednio: $2,5\%^2$ (W_t^r), $1,6\%^2$ (A^r), 9000 (kcal/kg) 2 (Q_i^r) i $0,0004\%^2$ (S_t^r).

Porównanie semiwariogramów relatywnych wszystkich parametrów (rys. 4), pozwoliło potwierdzić niewielką zmienność parametrów W_t^r , Q_i^r i S_t^r . Wyrażała się ona wartościami efektu samorodków poszczególnych parametrów mniejszymi od 0,01 [–]. Największą zmiennością spośród nich cechowała się zawartość siarki całkowitej. Zmienność zawartości wilgoci i wartości opałowej kształtowała się na podobnym, bardzo niskim poziomie. Zmienność zawartości popiołu okazała się być od kilkadziesiąt do kilkuset razy większa od zmienności parametrów W_t^r , Q_i^r i S_t^r .

W związku z niewielkim względnym zróżnicowaniem zawartości wilgoci całkowitej i wartości opałowej, zmienność tych parametrów przybliżono za pomocą modeli losowych.

TABELA 1

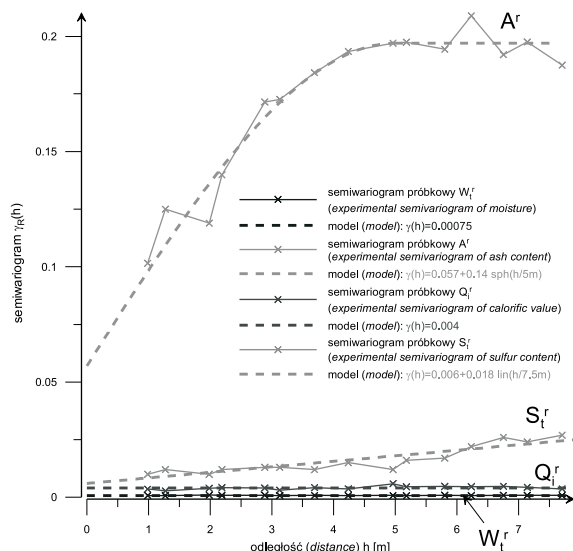
Geostatystyczne modele poziomej zmienności parametrów jakościowych węgla w polu doświadczalnym.
Pole Bełchatów

TABLE 1

Geostatistical models of horizontal variability of the lignite qualitative parameters from the experimental area (Bełchatów area)

Parametry	Semiwariogram		Test krzyżowy $\bar{\varepsilon} / \sigma_{\varepsilon}$	Korelacja i regresja liniowa $z_i^0 = b_0 + b_1 \cdot z_{ki}^*$
	typ	model		
W_t^r	BI	$\gamma(h) = 2,5$	n.o.	n.o.
	RI	$\gamma(h) = 0,00075$	n.o.	n.o.
A^r	BI	$\gamma(h) = 1,6 + 3,1 \text{ sph}(h/5,3 \text{ m})$	0,001/1,009	$r = 0,57, b_0 = 0,50, b_1 = 0,89$
	RI	$\gamma(h) = 0,057 + 0,14 \text{ sph}(h/5 \text{ m})$	n.o.	n.o.
Q_i^r	BI	$\gamma(h) = 9000 + 7500 \text{ sph}(h/4,5 \text{ m})$	0,004/1,008	$r = 0,35, b_0 = 386,5, b_1 = 0,80$
	RI	$\gamma(h) = 0,004$	n.o.	n.o.
S_t^r	BI	$\gamma(h) = 0,00038 + 0,00058 \text{ lin}(h/9 \text{ m})$	0,016/1,012	$r = 0,43, b_0 = 0,03, b_1 = 0,84$
	RI	$\gamma(h) = 0,006 + 0,018 \text{ lin}(h/7,5 \text{ m})$	n.o.	n.o.

W_t^r – zawartość wilgoci całkowitej; A^r – zawartość popiołu; Q_i^r – wartość opałowa; S_t^r – zawartość siarki całkowitej; BI – semiwariogramy bezwzględne, izotropowe; RI – semiwariogramy relatywne, izotropowe; $\bar{\varepsilon}$ – średni, względny błąd oceny wartości parametru w punktach opróbowania; σ_{ε} – odchylenie standardowe (względne) błędu ε ; z_i^0 – rzeczywista wartość parametru w i -tym punkcie opróbowania; z_{ki}^* – wartość parametru w i -tym punkcie opróbowania oszacowana metodą krigingu punktowego; r – współczynnik korelacji liniowej Pearsona; b_0 i b_1 – wyraz wolny i współczynnik kierunkowy prostej w liniowym modelu regresji; n.o. – nie obliczono



Rys. 4. Semiwariogramy relatywne, izotropowe parametrów jakościowych węgla w polu doświadczalnym (pole Bełchatów)

Fig. 4. Relative omnidirectional semivariograms of the lignite qualitative parameters from the experimental area (Bełchatów area)

W przypadku zawartości popiołu zastosowano model sferyczny, a w przypadku zawartości siarki całkowitej – model liniowy.

Analiza potwierdziła wyraźny podział parametrów na dwie grupy. Do pierwszej, charakteryzującej się niskim poziomem zmienności parametrów oraz losowymi lub zbliżonymi do losowych rozkładami wartości semiwariogramów należały: zawartość wilgoci całkowitej oraz wartość opałowca. Druga grupa charakteryzowała się wyższymi poziomami zmienności wskaźników węgla oraz znacznym udziałem składników nielosowych wariancji całkowitych (na poziomie ok. 60%). Należały do niej zawartość popiołu i zawartość siarki całkowitej.

Na podstawie przeprowadzonych badań należy stwierdzić, że spośród badanych wskaźników jakości węgla jedynie zawartość popiołu można uznać za parametr znacznie i nielosowo zmienny w skali lokalnej.

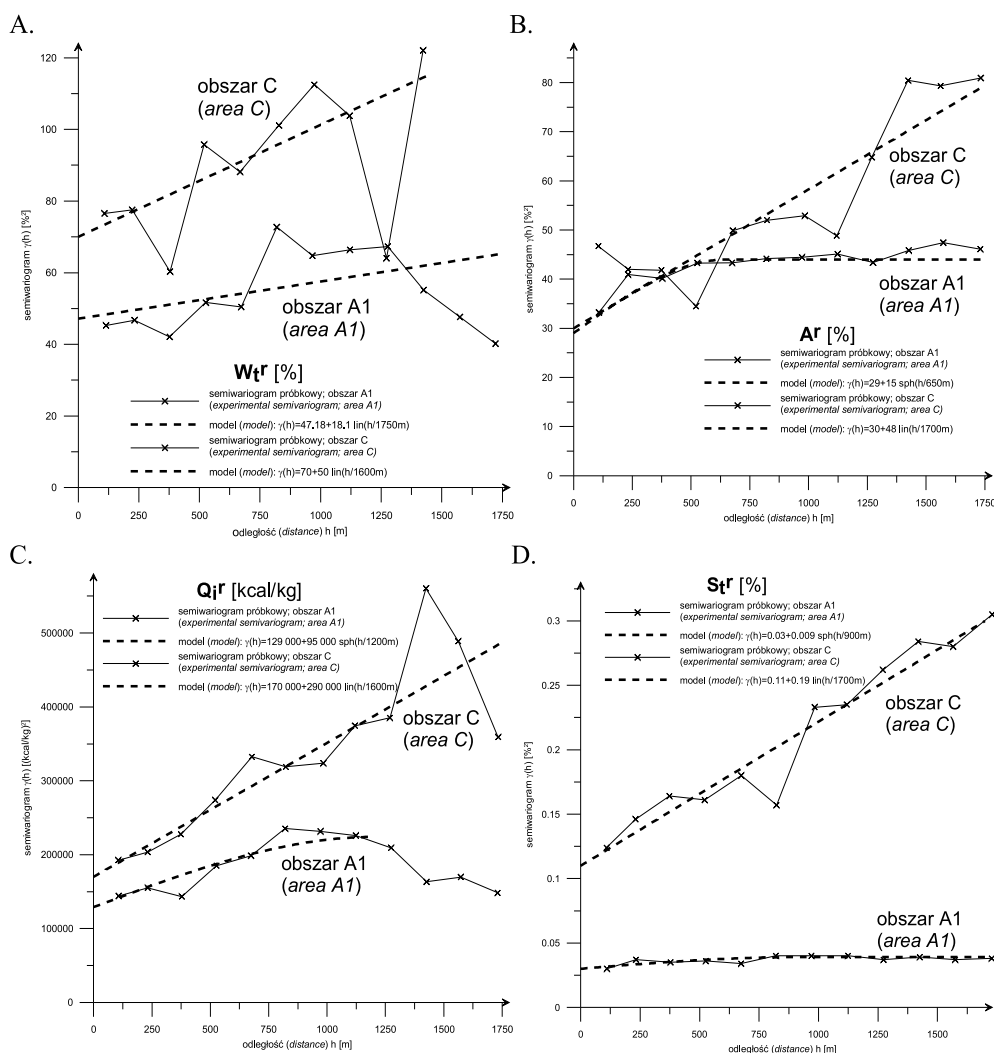
4.2. Geostatystyczne regionalne, poziome modelowanie parametrów jakości węgla w obszarach A1 i C

W geostatystycznym przybliżeniu regionalnej, izotropowej zmienności parametrów węgla w obszarach A1 i C (poziom ok. 36 m n.p.m.) (rys. 1) stosowano wyłącznie modele liniowe i sferyczne (rys. 5). W obszarze C, charakteryzującym się generalnie wyższym poziomem zmienności wszystkich analizowanych parametrów węgla niż obszar A1 (Bartuś, 2005), we wszystkich przypadkach stosowano modele liniowe. W obszarze A1 wszystkie parametry węgla poza zawartością wilgoci całkowitej modelowane były z wykorzystaniem modeli sferycznych. We wskazanym wyjątku zastosowano model liniowy.

Progi autokorelacji w modelach sferycznych występowały w zakresie 650–1200 m, przy czym najniższe wartości obserwowano dla zawartości popiołu (ok. 650 m), a najwyższe dla wartości opałowca (ok. 1200 m). Dla zawartości siarki całkowitej w obszarze A1, próg autokorelacji (ok. 900 m) był słabo zauważalny z uwagi na zbliżony do losowego charakter zmienności tego parametru.

W przypadku wartości opałowca w obszarze A1 wyraźnie zaznaczył się okresowy wzrost i następnie spadek wartości semiwariogramu. Ma on charakter trendu. W literaturze geostatystycznej określane jest jako „efekt dziury” (ang.: *hole effect*) (Armstrong 1998; Namysłowska-Wilczyńska 2006). W związku z trudnościami w weryfikacji modeli uwzględniających „efekt dziury”, modelowano do odległości 1200 m pomiędzy miejscami opróbowania (rys. 5C).

Wyniki testów krzyżowych potwierdziły dobre dopasowanie modeli geostatystycznych. Przeprowadzona analiza korelacji pomiędzy wyestymowanymi wartościami parametrów w punktach opróbowania oraz rzeczywistymi wartościami tych parametrów, ujawniła w niektórych przypadkach zupełną losowość struktur zmienności tych parametrów. Tak było w przypadku zawartości wilgoci całkowitej, dla której w trakcie analiz uzyskano bardzo niskie, a nawet ujemne współczynniki korelacji Pearsona. Dającą się zauważyć prawidłowością było z reguły lepsze dopasowanie modeli w obszarze C niż w A1. Obliczone współczynniki korelacji w obszarze C wyniosły dla parametru S_f^f : 0,64, dla A^f : 0,57, a dla Q_i^f : 0,44 (tab. 2).



Rys. 5. Semiwariogramy bezwzględne izotropowe wilgoci całkowitej (A), zawartości popiołu (B), wartości opałowej (C) i zawartości siarki całkowitej (D) w obszarach A1 i C (pole Bełchatów), poziom ok. 36 m n.p.m.

Fig. 5. Omnidirectional semivariograms of the total moisture (A), ash content (B), calorific value (C) and sulfur content (D) from the A1 and C area (Bełchatów area), horizon 36 m above sea level

Lepsze dopasowanie modeli w obszarze C niż w A1 potwierdziły też obliczone udziały nielosowych składników wariancji całkowitej badanych parametrów (U_N). Poza zawartością wilgoci całkowitej ($U_N = 42\%$), wszystkie udziały nielosowe w obszarze C kształtowały się na poziomie około 60%. W obszarze A1 najwyższy udział składnika nielosowego występował dla wartości opałowej – 42%, a najniższy dla zawartości siarki całkowitej – 23%. Udziały składników nielosowych dla zawartości wilgoci całkowitej i zawartości popiołu kształtowały się na podobnym poziomie około 30%.

TABELA 2

Geostatystyczne modele poziomej zmienności parametrów jakościowych węgla obliczone bez wykorzystania (BI_{reg}) oraz z wykorzystaniem znajomości lokalnej zmienności parametrów w polu doświadczalnym ($BI_{lok\®}$).
Pole Bełchatów, obszary A1 i C, poziom ok. 36 m n.p.m.

TABLE 2

Geostatistical models of horizontal variability of the lignite qualitative parameters calculated without (BI_{reg}) and with use of the local variability from the experimental area ($BI_{lok\®}$).
Bełchatów area, A1 and C areas, horizon 36 m above sea level

Parametry	Obszar	Semiwariogram		Test krzyżowy	Korelacja i regresja liniowa
		typ	model		
W_t^r	A1	BI_{reg}	$\gamma(h) = 47 + 18,1 \text{ lin (h/1750 m)}$	0,009/1,045	$r = 0,17, b_0 = 32,17, b_1 = 0,39$
		$BI_{lok\®}$	$\gamma(h) = 2,5 + 45 \text{ Gauss (h/90 m)} + 16,78 \text{ lin (h/1670 m)}$	0,001/1,115	$r = 0,19, b_0 = 32,62, b_1 = 0,38$
	C	BI_{reg}	$\gamma(h) = 70 + 50 \text{ lin (h/1600 m)}$	0,001/1,101	$r = -0,18, b_0 = 70,49, b_1 = 0,57$
		$BI_{lok\®}$	$\gamma(h) = 2,5 + 67,6 \text{ Gauss (h/90 m)} + 50 \text{ lin(h/1600 m)}$	-0,011/1,320	$r = -0,23, b_0 = 69,82, b_1 = 0,56$
A^r	A1	BI_{reg}	$\gamma(h) = 29 + 15 \text{ sph (h/650 m)}$	0,007/0,973	$r = 0,47, b_0 = 0,94, b_1 = 0,89$
		$BI_{lok\®}$	$\gamma(h) = 1,6 + 40,2 \text{ exp (h/180 m)} + 4,7 \text{ lin(h/1570 m)}$	0,003/0,913	$r = 0,52, b_0 = 0,93, b_1 = 0,88$
	C	BI_{reg}	$\gamma(h) = 30 + 48 \text{ lin (h/1700 m)}$	0,043/1,052	$r = 0,57, b_0 = 1,76, b_1 = 0,85$
		$BI_{lok\®}$	$\gamma(h) = 1,6 + 33 \text{ exp (h/80 m)} + 39 \text{ lin(h/1670 m)}$	0,040/1,057	$r = 0,54, b_0 = 2,49, b_1 = 0,80$
Q_i^r	A1	BI_{reg}	$\gamma(h) = 129\ 000 + 95\ 000 \text{ sph (h/1200 m)}$	0,005/1,040	$r = 0,39, b_0 = 489,58, b_1 = 0,76$
		$BI_{lok\®}$	$\gamma(h) = 13\ 000 + 135\ 000 \text{ Gauss(h/80 m)} + 80\ 000 \text{ lin(h/1120 m)}$	0,008/1,177	$r = 0,38, b_0 = 800,27, b_1 = 0,62$
	C	BI_{reg}	$\gamma(h) = 170\ 000 + 290\ 000 \text{ lin(h/1600 m)}$	-0,017/1,076	$r = 0,44, b_0 = 472,12, b_1 = 0,77$
		$BI_{lok\®}$	$\gamma(h) = 13\ 000 + 155\ 000 \text{ Gauss(h/80 m)} + 300\ 000 \text{ lin(h/1670 m)}$	-0,009/1,171	$r = 0,38, b_0 = 716,76, b_1 = 0,64$
S_t^r	A1	BI_{reg}	$\gamma(h) = 0,03 + 0,009 \text{ sph (h/900 m)}$	0,028/0,912	$r = 0,22, b_0 = 0,19, b_1 = 0,57$
		$BI_{lok\®}$	$\gamma(h) = 0,00038 + 0,03 \text{ Gauss (h/38 m)} + 0,009 \text{ sph(h/900 m)}$	0,024/0,991	$r = 0,25, b_0 = 0,17, b_1 = 0,62$
	C	BI_{reg}	$\gamma(h) = 0,11 + 0,19 \text{ lin (h/1700 m)}$	0,031/0,959	$r = 0,64, b_0 = 0,014, b_1 = 0,96$
		$BI_{lok\®}$	$\gamma(h) = 0,00038 + 0,11 \text{ Gauss (h/38 m)} + 0,19 \text{ lin(h/1700 m)}$	0,032/0,958	$r = 0,64, b_0 = 0,016, b_1 = 0,96$

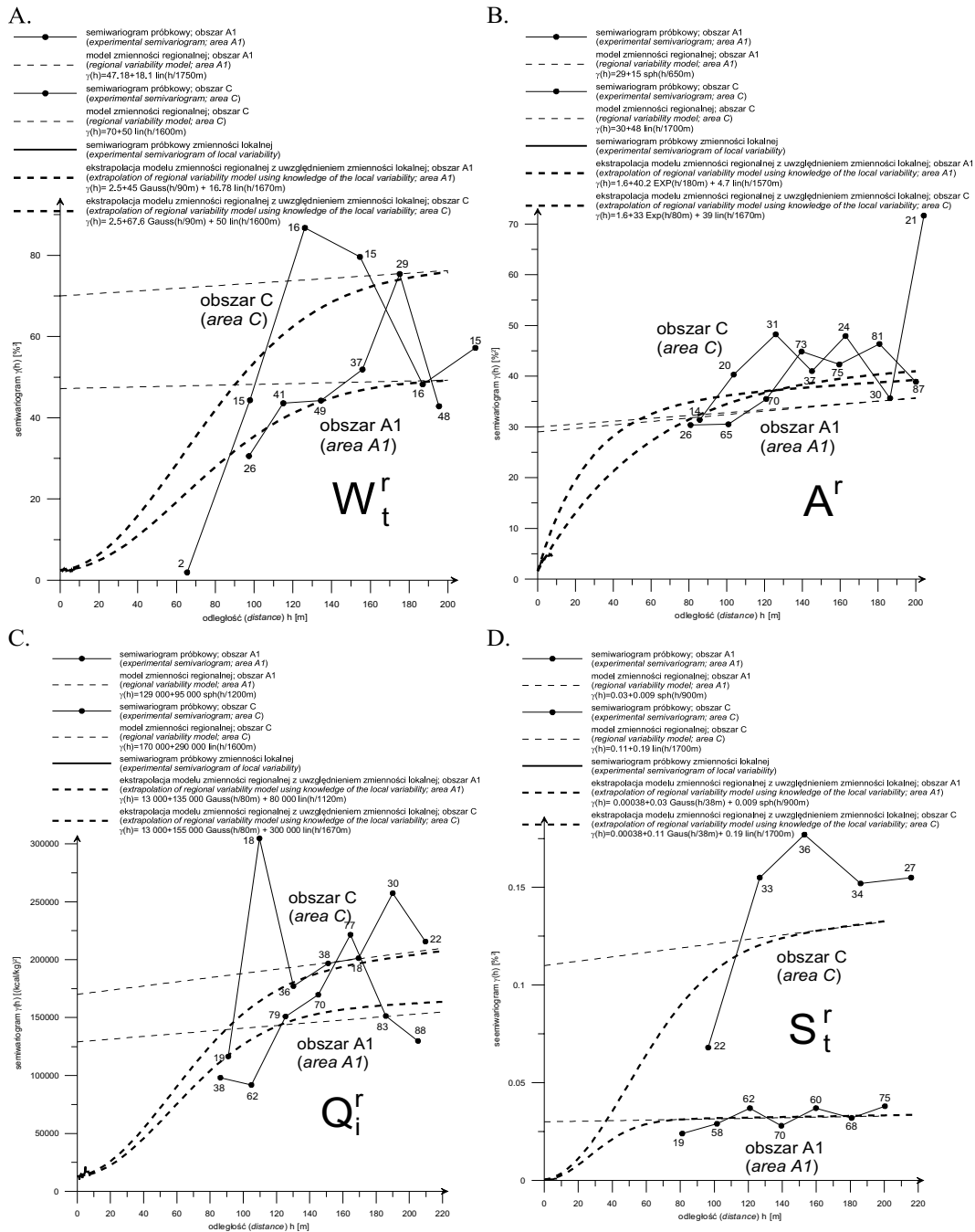
4.3. Geostatystyczne, poziome, regionalne modelowanie parametrów jakości węgla wykorzystujące informację o zmienności lokalnej

Do aproksymacji semiwariogramów stosowano modele złożone. Dla zawartości wilgoci całkowitej, wartości opałowej i zawartości siarki całkowitej w obszarze A1 stosowano modele Gaussa wraz z modelami liniowymi, a w przypadku zawartości siarki całkowitej w obszarze A1 wraz z modelem sferycznym. W przypadku zawartości popiołu zastosowano modele Formery'ego w połączeniu z modelami liniowymi. Dobór modelu Gaussa lub potęgowego wynikał z charakteru zmienności parametru w skali lokalnej (rys. 6).

Otrzymane wyniki testów krzyżowych (tab. 2) dowodzą braku zasadniczej poprawy jakości modelowania uwzględniającego zmienność lokalną. Jedynie w przypadku zawartości popiołu i zawartości siarki całkowitej można zaobserwować nieznaczną poprawę dopasowania modeli. W przypadku pozostałych dwóch parametrów nie uzyskano poprawy wyników estymacji lub wyniki uległy pogorszeniu. Prawidłowość ta jest spełniona zarówno w przypadku obszaru A1 jak i C. Odchylenia standardowe (względnych) błędów oceny wartości parametru w punktach opróbowań często wykraczały poza dopuszczalną wartość 1.1. Wiąże się to zapewne z losowymi lub zbliżonymi do losowych strukturami zmienności zawartości wilgoci całkowitej i wartości opałowej.

Na podstawie przeprowadzonych analiz korelacji należy stwierdzić, że modelowanie uwzględniające zmienność lokalną nie przyniosło oczekiwanych rezultatów. Nie otrzymano żadnego znaczącego wzrostu współczynników korelacji Pearsona wartości parametrów wyestymowanych geostatystycznie i wartości stwierdzonych w punktach opróbowania. Otrzymane wyniki w większości przypadków są zbliżone do otrzymanych wcześniej bez uwzględniania zmienności lokalnej lub są nieco od nich gorsze. Nieznaczną poprawę dopasowania modeli do semiwariogramów empirycznych uzyskano wyłącznie w obszarze A1. Można zauważyć niewielki wzrost wartości współczynników korelacji liniowej dla zawartości wilgoci całkowitej, zawartości popiołu i zawartości siarki całkowitej. Najwyraźniejszą poprawę estymacji parametru uzyskano dla zawartości popiołu (w obszarze A1). Współczynnik korelacji Pearsona wzrósł w tym przypadku od wartości 0,47 (dla modelu bez uwzględnienia zmienności lokalnej) do wartości 0,52 (po uwzględnieniu zmienności lokalnej).

Dla obszaru C niemal wszystkie przeprowadzone analizy dały gorsze rezultaty. Jedynie w przypadku zawartości siarki całkowitej, współczynnik korelacji wartości wyestymowanych geostatystycznie i wartości stwierdzonych w punktach opróbowania okazał się być na najwyższym – identycznym jak w przypadku analizy nie uwzględniającej zmienności lokalnej – poziomie 0,64.



Rys. 6. Semiwariogramy bezwzględne izotropowe wilgoci całkowitej (A), zawartości popiołu (B), wartości opałowej (C) i zawartości siarki całkowitej (D) w obszarach A1 i C (pole Belchatów)

Fig. 6. Omnidirectional semivariograms of the total moisture (A), ash content (B), calorific value (C) and sulfur content (D) from the A1 and C area (Belchatów area)

Podsumowanie

Przeprowadzone analizy jednoznacznie wykazały, że wyłącznie w przypadku zawartości popiołu i siarki całkowitej, uzasadniona jest estymacja parametrów węgla za pomocą metody geostatystycznej. Dwa pozostałe parametry węgla (zawartość wilgoci całkowitej oraz wartość opałowa) z powodzeniem mogą być estymowane za pomocą metod statystyki klasycznej. Niskie poziomy względnej zmienności i bardzo duży udział losowego składnika wariancji całkowitej wskazują, że zastosowanie innych metod estymacji raczej nie poprawi jakości ich oceny.

Pomimo ujawnienia lokalnego zróżnicowania zmienności badanych parametrów w funkcji kierunku obserwacji, estymacja parametrów węgla wykorzystująca informację anizotropową nie przyniosła wyraźnej poprawy jakości estymacji. Semiwariogramy bezwzględne izotropowe w wystarczająco dobrym stopniu opisywały struktury zmienności badanych parametrów zarówno w skali lokalnej jak i regionalnej.

Geostatystyczne modelowanie horyzontalnej, regionalnej zmienności parametrów jakości węgla z uwzględnieniem zmienności lokalnej pozwoliło na doprecyzowanie semiwariogramów zmienności regionalnej w zakresie niewielkich odległości pomiędzy miejscami opróbowania. Procedura obliczeń geostatystycznych nie przyniosła jednak oczekiwanych rezultatów. Współczynniki korelacji wartości wyestymowanych geostatystycznie i wartości stwierdzonych parametrów w punktach opróbowania pozostały na podobnych poziomach jak w przypadku analiz nie uwzględniających zmienności lokalnej. Nieznacznie lepsze wyniki estymacji parametrów węgla z uwzględnieniem zmienności lokalnej przyniosła analiza parametrów w obszarze A1 niż w obszarze C (rys. 1). Mogło się to wiązać z silnymi synsedymencyjnymi i tektonicznymi zaburzeniami strefy rowu drugiego rzędu (C).

Brak bardzo wyraźnej poprawy estymacji parametrów węgla wykorzystującej znajomość zmienności lokalnej nie dyskredytuje zastosowanej metody. W związku z przyjętą metodyką, przy zastosowaniu klasycznych modeli regionalnych, największych błędów estymacji parametrów należało się spodziewać dla zakresów odległości mniejszych od minimalnej odległości pomiędzy punktami sieci rozpoznawczej. Podejście prezentowane w pracy pozwoliło na wyeliminowanie lub znaczne ograniczenie tego mankamentu.

Mając świadomość, że wyniki analiz lokalnej zmienności parametrów węgla z pola doświadczalnego dotyczą jednego, izolowanego miejsca i wcale nie muszą odzwierciedlać poziomu zmienności lokalnej w innych częściach złoża, należy postulować wykonanie badań porównawczych w innych rejonach i na innych poziomach eksploatacyjnych pola Bełchatów.

Wyznaczone w trakcie badań zmienności lokalnej wartości tzw. efektu samorodków, pozwoliły na szacunkowe określenie maksymalnego, łącznego poziomu błędów opróbowania, przygotowania prób do analiz (homogenizacji, pomniejszania) oraz błędów analiz laboratoryjnych przeprowadzonych przez laboratorium KWB Bełchatów. Wariancje poszczególnych błędów wynosiły odpowiednio: $2,52\%$ (W_t^r), $1,62\%$ (A^r), 9000^2 (kcal/kg) (Q_t^r) i $0,00042\%$ (S_t^r).

Realizacja niniejszej pracy była możliwa dzięki wsparciu finansowemu udzielonemu przez Komitet Badań Naukowych, w ramach prac statutowych nr 11.11.140.447.

LITERATURA

- Armstrong, 1998 – Basic linear geostatistics. Springer – Verlag, str. 156. Berlin.
- Bartuś T., 2005 – Statystyczne modele zmienności parametrów jakości węgla brunatnego w centralnej części złoża Bełchatów. AGH, Kraków (praca doktorska), 1–197.
- Bartuś T., 2007 – Przyczynek do badań lokalnej, poziomej zmienności głównych parametrów jakości węgla brunatnego w centralnej części złoża Bełchatów. Analizy statystyczne. Kwartalnik AGH Geologia 33, z. 1, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków, 89–107.
- Ciepliński A., Uberman R., 1995 – Wykorzystanie konwencjonalnych i geostatystycznych metod badania zmienności parametrów złożowych do projektowania, planowania eksploatacji złóż zaburzonych węgla brunatnego. [W:] Identyfikacja i modelowanie warunków zalegania oraz wybierania trudno urabialnych kompleksów geologicznych zaburzonych złóż węgla brunatnego, Poltegor – Instytut, Wrocław, 41–81.
- Czarnecki L., Frankowski R., Kusznerek J., 1992 – Syntetyczny profil litostratygraficzny utworów trzeciorzędu złoża Bełchatów. Materiały XV Sympozjum „Geologia formacji węglonośnych Polski”, Kraków, 18–23.
- Gotowała R., 1994 – Model tektoniki rowu Kleszczowa – interpretacja danych z wykorzystaniem metod komputerowych. Materiały Konferencji „Tektonika rowu Kleszczowa – stan badań i główne zadania w aspekcie eksploatacji górniczej”, Bełchatów, 92–103.
- Gotowała R., Hałuszczak A., 1999 – Pozycja i główne etapy młodoolpejskiego rozwoju rowu Kleszczowa w świetle badań mezostrukturalnych w odkrywcę KWB Bełchatów i numerycznej analizy wyników wierceń. Materiały Konferencji „Młodoolpejski rów Kleszczowa: rozwój i uwarunkowania w tektonice regionu. Odkrywka KWB Bełchatów i obszar radomszczańsko-wieluńsko-łódzki”, Wrocław, 23–31.
- Hałuszczak A., 1994 – Główne etapy ewolucji strukturalnej utworów kenozoicznych rowu Kleszczowa. Materiały Konferencji „Tektonika rowu Kleszczowa – stan badań i główne zadania w aspekcie eksploatacji górniczej”, Bełchatów, 78–90.
- Kasiński J.R., 1984 – Tektonika synsedymacyjna jako czynnik warunkujący sedymentację formacji brunatnowęglowej w zapadliskach tektonicznych na obszarze zachodniej Polski. Przegląd Geologiczny 5, 260–268.
- Kokosz Z., Mucha J., 1983 – Zasady doboru wariogramu przy obliczaniu wielkości błędów ekstensji. Przegląd Geologiczny 2, Warszawa, 83–90.
- Matl K., 2000 – Wybrane elementy budowy geologicznej złoża Bełchatów. Prace Geologiczne PAN O. Kraków, nr 147, IGSMiE PAN, Kraków, 11–19.
- Mucha J., 1988 – Zmienność lokalna rud Zn-Pb w złożu „Pomorzany”. Gospodarka Surowcami Mineralnymi t. 4, z. 4, IGSMiE PAN, Kraków, 877–891.
- Mucha J., 1991 – Wybrane metody matematyczne w geologii górniczej. Skrypty Uczelniane nr 1215, Wydawnictwo AGH, Kraków, 1–157.
- Mucha J., 1994 – Metody geostatystyczne w dokumentowaniu złóż. Wydawnictwo AGH, Kraków, 1–155.
- Mucha J., 2001 – Bariery i ograniczenia geostatystycznej oceny parametrów złożowych. Zesz. Nauk. AGH, Geologia, 2–4, Kraków, 641–658.
- Namysłowska-Wilczyńska B., 2006 – Geostatystyka. Teoria i zastosowania. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1–356.
- Nieć M., 1990 – Geologia kopalniana. Wydawnictwa. Geologiczne, Warszawa, 1–504.
- Naworyta W., 2008 – Analiza zmienności parametrów złożowych węgla brunatnego pod kątem sterowania jakością strumienia urobku. Gospodarka Surowcami Mineralnymi t. 24, z. 2/4, IGSMiE PAN, Kraków, 97–110.

- Słomka T., Mucha J., Mastej W., Bartuś T., Dolik M., Słomka E., Leśniak T., 2002 – Geostatystyczna analiza głównych parametrów jakościowych węgla brunatnego pola Bełchatów. Archiwum KWB Bełchatów, nr umowy 02/88/2002, Kraków.
- Słomka T., Mucha J., Mastej W., Bartuś T., Słomka E., Leśniak T., 2003 – Metodyka szacowania zasobów i jakości złoża węgla brunatnego „Bełchatów” (pole Bełchatów i pole Szczerców) przy zastosowaniu geostatystycznej procedury krigingu. Archiwum KWB Bełchatów, nr umowy 8/99/2003, Kraków.
- Wagner M., 2000 – Petrografia i praktyczne znaczenie paratonsteinów ze złoża węgla brunatnego Bełchatów. Prace Geologiczne PAN O. Kraków, nr 147, IGSMiE PAN, Kraków, 101–122.
- Wysokiński L., Zapaśnik T., 1984 – Poligeniczność tektonicznego rowu Kleszczowa. Technika Poszukiwań Geologicznych 2, 2–6.

**GEOSTATYSTYCZNA ESTYMACJA PARAMETRÓW JAKOŚCI WĘGLA BRUNATNEGO W POLU BEŁCHATÓW
WYKORZYSTUJĄCA ZNAJOMOŚĆ ZMIENNOŚCI LOKALNEJ**

Słowa kluczowe

Złoże węgla brunatnego Bełchatów, geostatystyczne modele, semiwariogramy bezwzględne

Streszczenie

Złoże węgla brunatnego Bełchatów położone jest w centralnej Polsce w rowie tektonicznym Kleszczowa. Przedmiotem badań była lokalna, horyzontalna zmienność wybranych parametrów złożowych, przeanalizowana geostatystycznie za pomocą semiwariogramów. Podstawę badań stanowiły wyniki specjalnie wykonanego opróbowania niewielkiego fragmentu złoża (pola doświadczalnego o rozmiarach poziomych 8×8 m), położonego w centralnej części pola Bełchatów. W pobranych próbach węgla oznaczono: zawartość wilgoci całkowitej, zawartość popiołu, wartość opałową i zawartość siarki całkowitej w stanach roboczych. Uzyskane opisy zmienności wymienionych parametrów w lokalnej skali obserwacji wykorzystano do geostatystycznego modelowania ich struktury zmienności w większej, regionalnej skali obserwacji odpowiadającej jednorodnym geologicznie obszarom pola Bełchatów (A1 i C).

Umożliwiło to zmodyfikowanie postaci modeli regionalnych przez doprecyzowanie ich przebiegu szczególnie w zakresie niewielkich odległości, mniejszych od minimalnego rozstawu między punktami rozpoznania.

Przeprowadzone procedury weryfikacyjne nie ujawniły jednak znaczącej poprawy estymacji parametrów w punktach złoża przy zastosowaniu zmodyfikowanych modeli wykorzystujących informację o zmienności lokalnej parametrów węgla w stosunku do modeli opartych wyłącznie na danych rutynowego opróbowania złoża.

W związku z dużą różnorodnością zaburzeń występujących w złożu Bełchatów oraz tym, że badania lokalnej, poziomej zmienności parametrów węgla ograniczono do jednego, izolowanego fragmentu złoża (pole doświadczalne), otrzymanych wyników nie należy ekstrapolować na całe pole Bełchatów. Poziomy lokalnej zmienności badanych parametrów mogą się różnić w zależności od rejonu i analizowanego poziomu stratygraficznego. Z powyższych względów, prezentowane wyniki należy traktować w sposób przyczynkowy i wymagający przeprowadzenia dodatkowych badań zmienności lokalnej w innych częściach pola Bełchatów.

GEOSTATISTICAL ESTIMATION OF LIGNITE QUALITATIVE PARAMETERS USING KNOWLEDGE
OF LOCAL VARIABILITY ON EXAMPLE OF BELCHATÓW AREA

Key words

Belchatów lignite deposit, geostatistical models, omnidirectional semivariograms

Abstract

Belchatów lignite deposit is located in the central part of Poland into the tectonic Kleszczów graben. The theme of research was local, horizontal variability of the chosen deposit parameters, geostatistically analysed by semivariograms. The base for the researches was results of the specially sampling of the small part the deposit (experimental area with horizontal size 8×8 m) located in the central part of Belchatów deposit. The lignite samples has been analysed regarding moisture, ash content, calorific value and sulfur content in the as received state. Obtained locale scale variability descriptions of the lignite parameters has been used to the geostatistical modeling variability structures into the bigger, regional parts of the Belchatów deposit (geologically homogeneous areas A1 and C).

This enabled us to modify the regional models by specifying semivariograms, especially in small range, smaller than the minimum range between deposit identification grid.

Executed analysis didn't reveal any significant improvement of the modeling quality which uses local variability information of the lignite parameters towards the classic modeling which is based on geostatistical regional models extrapolation

With reference to huge variability of perturbation in the Belchatów deposit and fact that the local horizontal lignite parameters variability research was reduced to the one isolated part of the deposit (experimental area), received results cannot be extrapolated to the whole Belchatów area. The levels of the local variability of researched parameters can depends on analysed area and stratigraphic horizons. For this reason presented results should be treated in contributory way and some confirmation research should be done in the other parts of the Belchatów area.