

TOMASZ BARTUŚ*

Anizotropia zmienności głównych parametrów jakości węgla brunatnego w polu Belchatów

Wprowadzenie

Złoże węgla brunatnego Belchatów zalega w rowie tektonicznym Kleszczowa, który ma rozciągłość W-E. W jego ramach wydzielono trzy obszary złoża: pole Kamieńsk (część E złoża), pole Belchatów (część centralna) i pole Szczerców (część W złoża). W 2010 r. Kopalnia Belchatów otrzymała od ministra środowiska koncesję na prowadzenie rozpoznania złoża Złoczew położonego jeszcze bardziej na zachód od eksploatowanego od sierpnia 2009 pola Szczerców. Pozyskiwany węgiel jest używany do celów energetycznych. Znajdująca się opodal kopalni elektrownia Belchatów zaspokaja około 1/5 potrzeb energetycznych kraju.

Złoże bełchatowskie charakteryzuje się skomplikowaną budową geologiczną, na którą miały wpływ: zjawiska neotektoniczne, procesy krasowe w skałach podłoża, neogeńskie i czwartorzędowe procesy akumulacyjno-erozyjne, zaburzenia glacitektoniczne, halokineza związana z obecnością wysadu solnego Dębiny, subrozja i inne. Wszystkie czynniki w różnym stopniu wpływały na warunki sedymentacji i zmienność litologiczną osadów neogenu, plejstocenu i holocenu. W znaczący sposób przyczyniły się także do zmienności parametrów jakości węgla w złożu. W związku z energetycznym przeznaczeniem węgla, do najważniejszych jego parametrów należy zaliczyć: zawartość wilgoci całkowitej, zawartość popiołu, obliczaną na podstawie ciepła spalania wartość opałową oraz zawartość siarki całkowitej.

* Dr inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Katedra Geologii Ogólnej, Ochrony Środowiska i Geoturystyki, Kraków; e-mail: bartus@agh.edu.pl

Wartości parametrów technologicznych kopaliny mogą się zmieniać w złożach w sposób losowy (opisywany modelami probabilistycznymi) bądź wykazywać przestrzenne uporządkowanie (opisywane modelami deterministycznymi). To uporządkowanie może wynikać ze zmienności badanych parametrów charakterystycznej dla różnych fragmentów złoża (niejednorodność strukturalna) bądź z występowaniem w złożach uprzywilejowanych kierunków, wzdłuż których wartości parametrów zmieniają się w różny sposób (anizotropia). Odkrycie anizotropowego charakteru zmienności parametrów złożowych ma znaczenie praktyczne. Na etapie rozpoznania złoża pozwala na odpowiednie zaprojektowanie geometrii i gęstości sieci rozpoznawczej. Na etapie przemysłowym pozwala na racjonalne kierowanie przodkami eksploatacyjnymi i kierunkami wybierania kopaliny. Pozwala także na prowadzenie eksploatacji, uwzględniającej zmienność jakościową kopaliny w złożu i wymogi produkcji surowca o możliwie stałych parametrach (Naworyta 2008). Dobre rozpoznanie i ocena zmienności parametrów węgla w złożu ma kluczowe znaczenie w ustalaniu planów ruchu przedsiębiorstwa. Podstawę rozpoznania struktury zmienności parametrów w złożach stanowią analizy danych pochodzących z prób bruzdowych pobieranych z rdzeni otworów wiertniczych lub odsłoneń na powierzchni odkrywek.

Celem artykułu była identyfikacja oraz charakterystyka anizotropii podstawowych parametrów technologiczno-chemicznych węgla brunatnego z pola Bełchatów.

1. Obszar i materiał badawczy

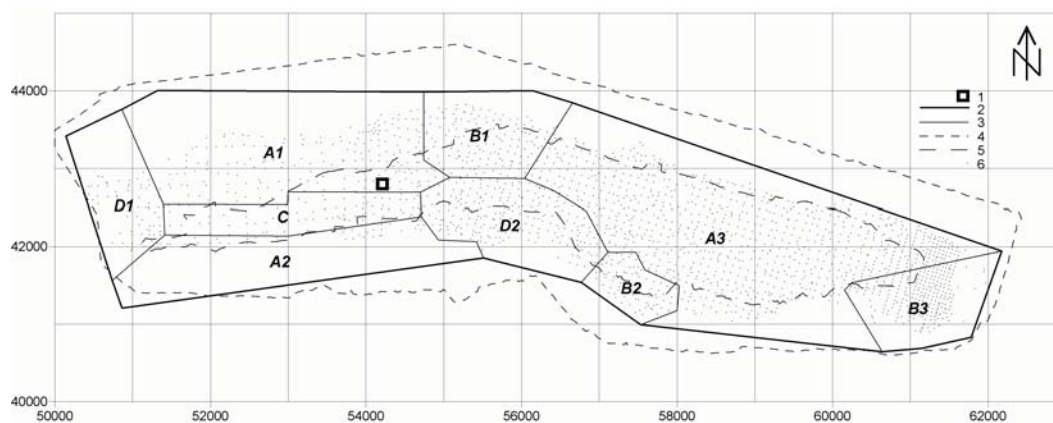
Badania prowadzone były w trzech skalach obserwacji: w skali lokalnej (zmienność lokalna) – w wydzielonym wycinku pokładu głównego 8×8 m – tzw. polu doświadczalnym (Bartuś 2007; Bartuś, Słomka 2009), w skali regionalnej (zmienność regionalna) – w wydzielonych dużych fragmentach pola Bełchatów nazywanych dalej obszarami oraz w skali całego pola Bełchatów (zmienność generalna). We wszystkich przypadkach przedmiotem badania była horyzontalna zmienność parametrów węgla w stanie roboczym. Analizowano zmienność zawartości wilgotności całkowitej (W_t^f), zawartości popiołu (A^f), wartości opałowej (Q_t^f) i zawartość siarki całkowitej (S_t^f) z najważniejszego pod względem ekonomicznym pokładu D, zwanego pokładem głównym węgla (PG) (Czarnecki i in. 1992; Matl 2000). Dane do analiz zmienności regionalnej i generalnej pochodziły z geologiczno-górnictwa Jednolitej Bazy Danych Geologicznych (JBDG) KWB Bełchatów. Według układu SI, prawidłową jednostką wyrażającą ciepło spalania i wartość opałową jest J/kg. W praktyce górniczej, w miejsce zalecanej przez normy jednostki, stosuje się często jednostkę zastępczą – cal/kg. W związku z zastosowaniem tej jednostki w dokumentacji JBDG KWB Bełchatów, wszelkie analizy prowadzono w jednostce cal/kg. Przeliczenia jednostek dokonuje się ze stosunku $1 \text{ [cal]} = 4,1868 \text{ [J]}$.

PG we wschodniej części pola Bełchatów jest oddzielony od pozostałych pokładów węgla wyraźnymi horyzontami skał płonnych (głównie piasków), a w zachodniej części zrasta się z pozostałymi pokładami kompleksu węglowego i w JBDG nie jest od nich

wyodrębniony. W związku z tym, przedmiotem badań w zachodniej części pola był w zasadzie cały kompleks węglowy, natomiast we wschodniej łatwy do wydzielenia pokład D.

Dane użyte w analizach i pochodzące z JBDG wyznaczone zostały jako średnie ważone z prób bruzdowych pobieranych wzdłuż osi pionowych otworów wiertniczych lub odkrywek. Współczynnikiem wag była miąższość prób bruzdowych. Zgodnie z kryteriami bilansowości węgla brunatnego, spośród warstw pokładu głównego usunięto skały płonne w przestostach większych niż 1,5 m. Do skał płonnych zaliczono utwory zawęglone, węgiel pozabilansowy nieprzemysłowy, ropy spropelowe, kostkowe, utwory nadkładu (nad PG), skały klastyczne (piaski, mułki, ropy) oraz inne skały – głównie wapienie jeziorne. Ostatecznie w badaniach uwzględniono: utwory zawęglone, węgle pozabilansowe przemysłowe, węgle bilansowe nieprzemysłowe i węgle bilansowe przemysłowe.

Do analiz lokalnej zmienności parametrów węgla wybrano fragment PG o rozmiarach 8×8 m, położony w środkowej części pola 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, Zapaśnik 1984; Gotowała 1994; Hałuszczak 1994; Gotowała, Hałuszczak 1999) (rys. 1). Siatkę opróbowania podzielono na 64 równe pola (o powierzchni ok. 1 m^2). Pobierano po jednej próbie z każdego pola (łącznie 64 próby). Masa każdej próby była w przybliżeniu jednakowa i wynosiła około 4 kg. Szczegółowe położenie i procedurę opróbowania przedstawiono w pracach: Bartuś 2007; Bartuś, Słomka 2009.



Rys. 1. Rozmieszczenie otworów wiertniczych w polu Bełchatów

- 1 – lokalizacja pola doświadczalnego; 2 – granica obszaru badań; 3 – obszary o podobnych warunkach sedimentacji 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

Podstawą do przeprowadzenia analizy zmienności regionalnej parametrów węgla było wyznaczenie homogenicznych obszarów pod względem warunków sedymentacji osadów PG. Do wyznaczenia ich granic posłużyły izoliniowe mapy: sumarycznej miąższości węgla, sumarycznej miąższości utworów piaszczystych oraz sumarycznej miąższości utworów wapnistych (wapieni lądowych) w PG. Dodatkowo wykorzystywano mapę głównych dyslokacji rowu Kleszczowa (Bartuś 2005).

Obszary o podobnym typie sedymentacji utworzyły grupy określone symbolami literowymi od A do D. Grupa A łączy środowiska sedymentacji fitogenicznej (tworzy trzy rozłączne strefy: północno-zachodnią [A1], południowo-zachodnią [A2] i wschodnią [A3]). Grupa B łączy środowiska sedymentacji fitogenicznej i węglanowej (tworzy trzy rozłączne strefy: północną [B1], południową [B2] i wschodnią [B3]). Grupa C wyznacza środowisko sedymentacji fitogenicznej w rowie drugiego rzędu. Ostatnia, grupa D, wyznacza obszary o środowiskach sedymentacji klastycznej i fitogenicznej (tworzy dwie rozłączne strefy – zachodnią [D1] i południową [D2]).

Do dalszej analizy zakwalifikowano wstępnie 2920 otworów wiertniczych z 134 055 rekordami danych (tab. 1). W dalszej części analizy, w związku z dużą ilością niekompletnych rekordów (brak wyników analiz wszystkich parametrów węgla), liczba otworów i rekordów ulegała często znacznemu obniżeniu.

TABELA 1

Charakterystyka wytypowanych obszarów badawczych

TABLE 1

Characteristics of selected research areas

Symbol obszaru	Powierzchnia [ha]	Liczba otworów wiertniczych	Ilość rekordów	Liczba otworów wiertniczych/1 km ²
A1	506,8	345	17 870	68,1
A2	291,4	165	6 217	56,6
A3	871,8	1 163	45 496	133,4
B1	176,2	214	8 324	121,5
B2	68,8	112	4 495	162,8
B3	162,1	354	18 195	218,4
C	137,9	109	8 676	79,0
D1	157,0	141	6 599	89,8
D2	211,7	317	18 183	149,7
Σ ABCD:	2 583,7	2 920	134 055	113,0

2. Metodyka

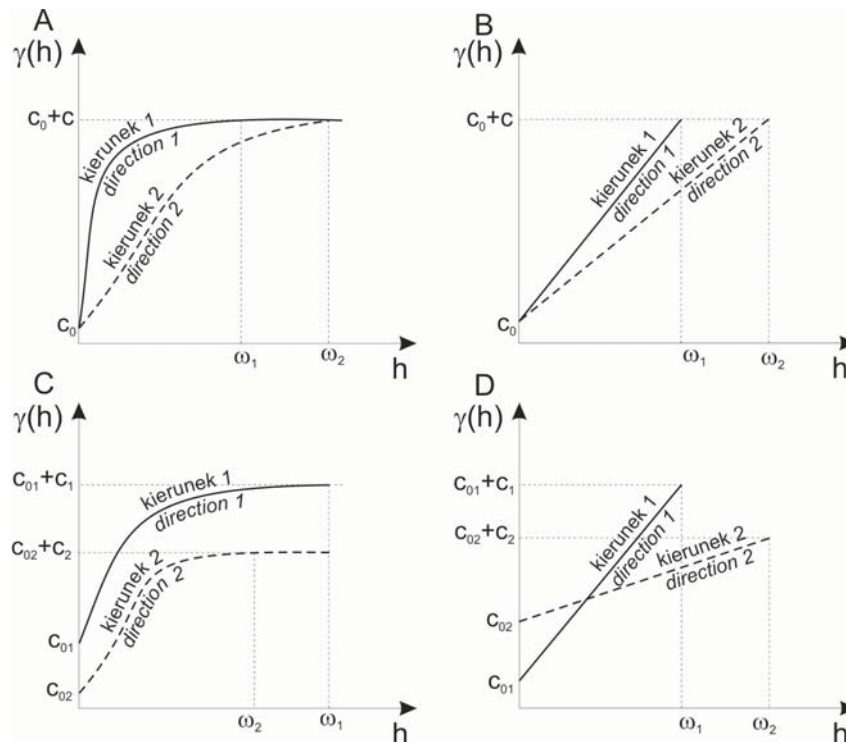
W statystycznych opisach zmienności rozmaitych parametrów, często można się zetknąć ze zjawiskiem anizotropii nazywanej także zmiennością kierunkową. Wartość badanych parametrów ulega zmianom w przestrzeni w różnym tempie, zależnym od przyjętego kierunku obserwacji. W praktyce istnieje wiele metod opisu takiej zmienności (Ciepliński, Uberman 1995; Kokesz, Mucha 1984; Mucha 1991, 1994; Nieć 1990). Wspólną ich cechą jest zastosowanie jednej miary anizotropii, którą jest iloraz maksymalnej i minimalnej zmienności parametrów obserwowanych w różnych kierunkach obserwacji.

W przeprowadzonych badaniach anizotropii zmienności parametrów w polu Bełchatów zastosowano klasyczną metodę geostatystyczną. W jej teorii istnieje ograniczenie mówiące o stacjonarności funkcji losowej opisującej zmienność analizowanych parametrów. W praktyce polega ono na przyjęciu założenia, że wartości oczekiwane średnich wartości badanych parametrów i struktury ich zmienności są stałe dla obszaru podlegającego analizie (Armstrong 1998; Kokesz 2006; Mucha 1994; Namysłowska-Wilczyńska 2006). W najbardziej typowych analizach geostatystycznych stosuje się uśrednione wariogramy generowane dla całości badanych obszarów.

W geostatystyce wyróżnia się dwa podstawowe rodzaje anizotropii: geometryczną (eliptyczną) i zonalną (strefową, stratyfikacji) (Armstrong 1984; Kokesz, Mucha 1984; Mucha 1994; Namysłowska-Wilczyńska 2006). W przypadku anizotropii geometrycznej, semiwariogramy opisujące zmienność parametrów dla dowolnego kierunku obserwacji są powiązane ze sobą przekształceniem afinicznym. Znając model wyznaczony dla dowolnego kąta obserwacji, można przez odpowiednie przekształcenie znaleźć właściwy model dla każdego innego kierunku obserwacji. W praktyce anizotropia tego typu objawia się różnymi zasięgami semiwariogramów dla różnych kierunków obserwacji (rys. 2A, B). Z anizotropią zonalną mamy do czynienia wtedy, gdy zmienność badanych parametrów w jednej płaszczyźnie wyraźnie odbiega od zmienności obliczonej w innej płaszczyźnie. W praktyce najczęściej można się z nią zetknąć w przypadku porównania zmienności parametrów badanych w płaszczyźnie horyzontalnej i pionowej. W związku ze stratyfikacją skał osadowych, zmienność pozioma osiąga najczęściej znacznie niższy poziom od zmienności pionowej. O istnieniu anizotropii zonalnej w geostatystycznych modelach de Wijisa i liniowych może świadczyć przecinanie się wykresów semiwariogramów obliczonych dla różnych kierunków obserwacji. Dla modeli sferycznych objawami istnienia anizotropii zonalnej mogą być zróżnicowane zasięgi semiwariogramów oraz różne wartości efektu samorodków C_0 i wariancji całkowitej $C_0 + C$ (rys. 2C, D).

Badaniom lokalnej, poziomej zmienności parametrów węgla w polu doświadczalnym poddano wszystkie cztery parametry (W_t^r , A^r , Q_t^r i S_t^r). Badaniom w skali regionalnej i generalnej poddano wyłącznie dwa najbardziej zmienne parametry węgla, które cechowały się przy tym znacznym udziałem deterministycznej części zmienności w wariancji całkowitej. Były nimi zawartość A^r oraz S_t^r .

W trakcie analiz stosowano klasyczną procedurę geostatystycznych badań anizotropii. Na jej wstępie sporządzano indykatory zmienności – izoliniowe wykresy wartości empi-



Rys. 2. Liniowe (B, D) i sferyczne (A, C) semiwariogramy kierunkowe w przypadkach występowania anizotropii geometrycznej (A, B) i zonalnej (C, D)

Fig. 2. Line (B, D) and spherical directional semivariograms in the cases geometric anisotropy (A, B) and zonal anisotropy (C, D)

rycznych semiwariogramów bezwzględnych w funkcji kierunków obserwacji. Punkty opróbowania z pola doświadczalnego kwalifikowane do analizy (zmienność lokalna) musiały być położone w wycinku koła wyznaczonego przez odłożenie kątów 15° od badanego kierunku zmienności. W przypadku analiz regionalnych i generalnych do wyznaczenia wartości semiwariogramów kierunkowych pobierano dane pochodzące z opróbowania skarp wyrobisk lub otworów wiertniczych położonych w wycinku koła wyznaczonego przez odłożenie kątów $11,25^\circ$ od badanego kierunku zmienności. W przypadku pola doświadczalnego zakres prowadzonych obserwacji wynosił do 4 m. Dla badań zmienności regionalnej, dla różnych obszarów, maksymalna odległość prowadzonych obserwacji wynosiła 500–3000 m, a dla skali generalnej ta sama odległość wynosiła 2000 m. Wykreślone indykatory pozwoliły na określenie dla każdego z parametrów kierunków maksymalnej i minimalnej zmienności. W następnym kroku, dla wyznaczonych ekstremalnych kierunków zmienności, obliczano empiryczne semiwariogramy bezwzględne. Zasięgi obserwacji w przypadku badań prowadzonych w polu doświadczalnym wynosiły do 7,5 m, w skali regionalnej 400–2000 m, a w skali generalnej do 4500 m. Dla W_i^r , Q_i^r i S_i^r obliczeń semiwariogramów próbkowych dokonywano z pomocą klasycznego wzoru G. Matherona. W przypadku A^r , w związku

z jego wyraźnie dodatnio asymetrycznym rozkładem, zastosowano odmienny estymator semiwariogramu, określany w literaturze jako „Inv-Cov semiwariogram” (Armstrong 1998; Isaaks, Srivastava 1989; Mucha 1994; Namysłowska-Wilczyńska 2006).

Do semiwariogramów próbkowych metodą graficzną dobierano geostatystyczne modele. Parametry modeli dobierano metodą prób i błędów, każdorazowo oceniając jakość dopasowania i poprawiając błędy (Kokesz, Mucha 1983). Do analiz wykorzystywano oprogramowanie *Surfer*, *GeoEAS*, *Variowin* i *GS+*. Poprawność doboru modeli testowano z zastosowaniem testu krzyżowego (cross-validation). Średnie błędy ocen wartości parametrów w punktach, dokonane metodą krigingu punktowego, powinny być równe 0, natomiast odchylenia standardowe błędów ocen nie powinny wykroczyć poza przedział 0,9–1,1. Poza testami krzyżowymi, miarą dopasowania geostatystycznych modeli były wyniki korelacji liniowej pomiędzy wyznaczonymi metodą krigingu punktowego ocenami wartości parametrów w punktach opróbowania oraz rzeczywistymi wartościami tych parametrów. Po dopasowaniu do semiwariogramów próbkowych satysfakcjonujących modeli geostatystycznych, obliczano udziały składników nielosowych w całkowitej zmienności parametru złożowego.

Zasadniczą częścią analizy było określenie dla każdego analizowanego obszaru i parametru węgla względnego poziomu anizotropii oraz określenie typu anizotropii.

Geostatystyczną miarą poziomu anizotropii jest tzw. współczynnik anizotropii (ang.: *Anisotropy Ratio*). W metodzie geostatystycznej definiuje się go jako stosunek zasięgu semiwariogramu (*Range*) dla kierunku minimalnej zmienności badanego parametru do zasięgu semiwariogramu dla kierunku jego maksymalnej zmienności. Jednocześnie przyjmuje się, że współczynnik anizotropii mniejszy od 2 jest uważany za łagodny, natomiast większy od 4 jest uważany za ostry (ciężki). Zwykle kiedy współczynnik anizotropii jest większy od 3 efekt jest wyraźnie zauważalny na mapach (Armstrong 1998; Surfer... 2002).

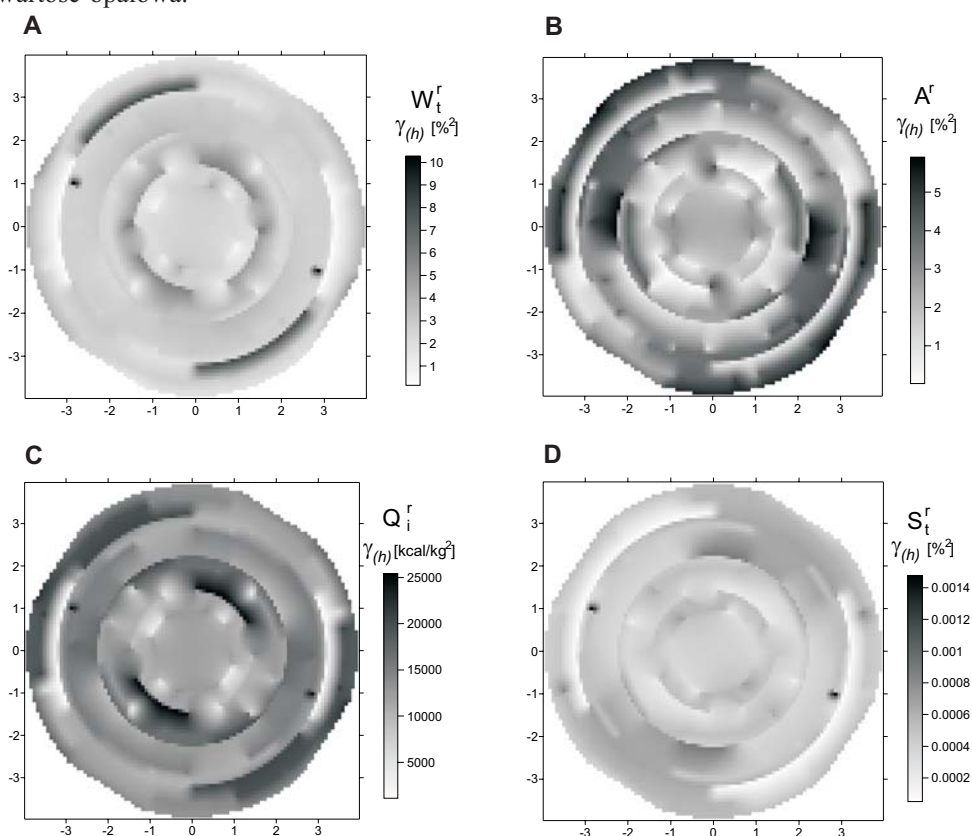
3. Wyniki

3.1. Lokalna, pozioma, kierunkowa zmienność parametrów węgla

Na podstawie indykatrys poziomej, lokalnej zmienności parametrów węgla (rys. 3) stwierdzono, że wyłącznie w przypadku zmienności zawartości siarki całkowitej można mówić o wyraźnej i regularnej (choć pod względem wartości niskiej) zmienności kierunkowej parametru (rys. 3D). W przypadkach pozostałych parametrów węgla anizotropia nie jest tak wyraźna i cechuje ją zmienność, którą można nazwać strefową. Polega ona na występowaniu równo oddalonych od centrum wykresów, kierunkowych zon o podobnej wartości semiwariogramów. Opiswane zjawisko może być spowodowane ograniczoną ilością danych wykorzystywanych w obliczeniach wartości semiwariogramów dla kolejnych kierunków obserwacji.

Kierunek największej zmienności zawartości wilgoci całkowitej (liczony względem osi odciętych, przeciwie z ruchem wskazówek zegara) wynosił około 135° (NW-SE), nato-

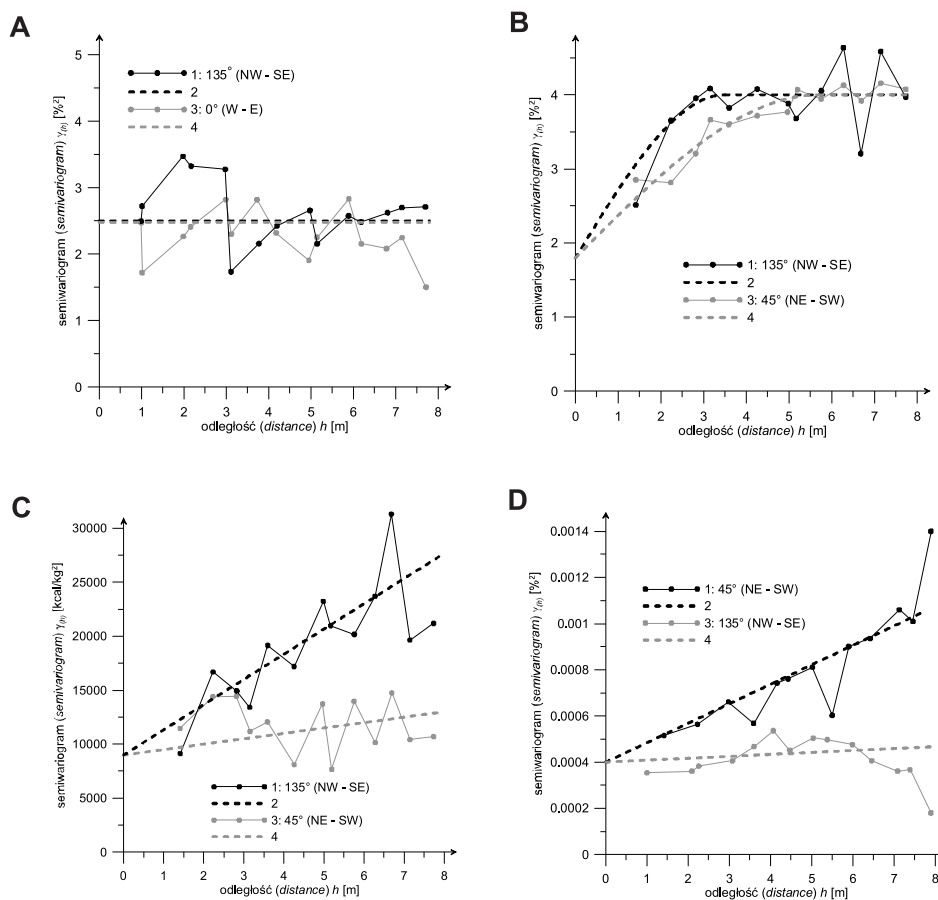
miast kierunek najmniejszej zmienności był zbliżony do 0° (rys. 3A). W przypadku zawartości popiołu (rys. 3B), kierunek najmniejszej zmienności wynosił około 45° (NE-SW), a kierunek największej zmienności był do niego prostopadły. Z podobną strukturą anizotropii zetknięto się w analizie wartości opałowej (rys. 3C). W przypadku zawartości siarki całkowitej kierunek maksymalnej zmienności wyraźnie różnił się od poprzednio omówionych i pokrywał się z kierunkiem minimalnej zmienności tych parametrów (rys. 3D). Najmniej wyraźną strukturę zmienności posiadała zawartość popiołu i powiązana z nią wartość opałowa.



Rys. 3. Izoliniowe wykresy wartości empirycznych semiwariogramów bezwzględnych, kierunkowych zawartości wilgoci całkowitej (A), zawartości popiołu (B), wartości opałowej (C) i zawartości siarki całkowitej (D) w polu doświadczalnym (pole Bełchatów)

Fig. 3. Isoline, directional semivariograms charts of the moisture (A); ash content (B); calorific value (C); sulfur content (D) from the experimental area (Bełchatów area)

Dla zidentyfikowanych ekstremalnych kierunków zmienności parametrów węgla obliczono geostatystyczne modele (rys. 4, tab. 2). W przypadku W_t^r , Q_i^r i S_t^r zmienność parametrów aproksymowano modelami liniowymi. Do wymodelowania A^r wykorzystano funkcje sferyczne. Poprawność doboru modeli testowano z zastosowaniem testu krzy-



Rys. 4. Semiwariogramy bezwzględne, kierunkowe zawartości wilgoci całkowitej (A), zawartości popiołu (B), wartości opałowej (C) i zawartości siarki całkowitej (D) w polu doświadczalnym (pole Bełchatów), równania modeli semiwariogramów znajdują się w tabeli 2, 1 – semiwariogram próbkowy liczony wzdłuż kierunku maksymalnej zmienności badanego parametru i jego model (2); 3 – semiwariogram próbkowy liczony wzdłuż kierunku minimalnej zmienności badanego parametru i jego model (4)

Fig. 4. Directional semivariograms of the moisture (A); ash content (B); calorific value (C); sulfur content (D) from the experimental area (Bełchatów area), semivariogram models equations can be found in Table 2, 1 – experimental semivariogram calculated along the maximum parameter variability direction and his model (2), 3 – experimental semivariogram calculated along the minimum parameter variability direction and his model (4)

żowego (tab. 2). We wszystkich przypadkach (poza stwierdzoną losową strukturą zmienności zawartości wilgoci całkowitej), wyniki testów dały pomyślne rezultaty.

Analiza postaci semiwariogramów pozwoliła na określenie rodzajów występującej anizotropii zmienności parametrów. W przypadku parametru A' anizotropia ma prawdopodobnie charakter geometryczny, a w przypadku Q_i' i S_i' – zonalny.

Analiza współczynników anizotropii (tab. 3) wykazała, że najwyższym, „ciężkim” poziomem anizotropii cechuje się zawartość siarki całkowitej ($A = 10$) i wartość opałowa

TABELA 2

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

TABLE 2

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

Param.	Semiwariogram		Test krzyżowy $\bar{\varepsilon} / \sigma_{\varepsilon}$	Korelacja i regresja liniowa $z_i^0 = b_0 + b_1 \cdot z_{ki}^*$
	typ	model		
W_i^r	BA _{min}	$\gamma(h) = 2,5$	n.o.	n.o.
	BA _{maks}	$\gamma(h) = 2,5$	n.o.	n.o.
A^r	BA _{min}	$\gamma(h) = 1,8 + 2,2 \text{ sph } (h/5,7 \text{ m})$	0,001/1,018	$r = 0,57$ $b_0 = 0,37$ $b_1 = 0,92$
	BA _{maks}	$\gamma(h) = 1,8 + 2,2 \text{ sph } (h/3,5 \text{ m})$		
Q_i^r	BA _{min}	$\gamma(h) = 9000,0 + 35000,0 \text{ lin } (h/70,0 \text{ m})$	-0,017/1,053	$r = 0,37$ $b_0 = 389,90$ $b_1 = 0,80$
	BA _{maks}	$\gamma(h) = 9000,0 + 35000,0 \text{ lin } (h/15,0 \text{ m})$		
S_i^r	BA _{min}	$\gamma(h) = 0,0004 + 0,00059 \text{ lin } (h/70 \text{ m})$	0,012/0,96	$r = 0,50$ $b_0 = 0,02$ $b_1 = 0,90$
	BA _{maks}	$\gamma(h) = 0,0004 + 0,00059 \text{ lin } (h/7 \text{ m})$		

Param. – parametr jakościowy węgla; W_i^r – zawartość wilgoci całkowitej; A^r – zawartość popiołu; Q_i^r – wartość opałowa; S_i^r – zawartość siarki całkowitej; BA_{min} – semiwariogramy bezwzględne, anizotropowe badane w kierunku najmniejszej zmienności parametru; BA_{maks} – semiwariogramy bezwzględne, anizotropowe badane w kierunku największej zmienności parametru; $\bar{\varepsilon}$ – średni, względny błąd oceny wartości parametru w punktach opróbowania; σ_{ε} – odchylenie standardowe (względne) błędów; 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

TABELA 3

Współczynniki anizotropii zmienności parametrów węgla w polu doświadczalnym

TABLE 3

Anisotropy ratio the main lignite parameters from the experimental area (Bełchatów area)

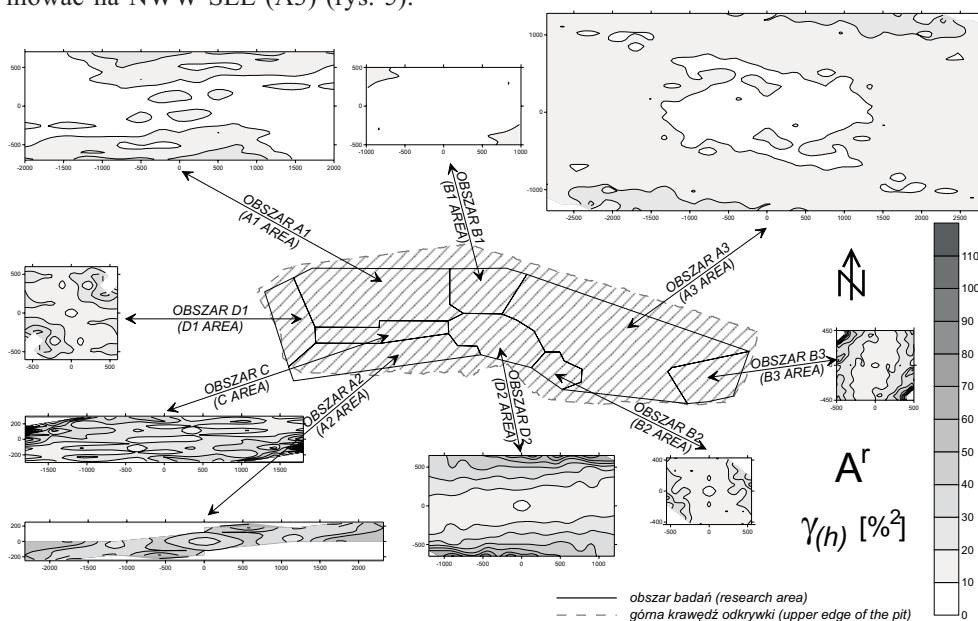
Parametr	R _{min} [m]	R _{maks} [m]	A [-]
W_i^r [%]	n.o.	n.o.	n.o.
A^r [%]	5,7	3,5	1,6
Q_i^r [kcal/kg]	70,0	15,0	4,6
S_i^r [%]	70,0	7,0	10,0

R_{min} – zasięg semiwariogramu dla kierunku minimalnej zmienności badanego parametru; R_{maks} – zasięg semiwariogramu dla kierunku maksymalnej zmienności badanego parametru; A – współczynnik anizotropii; n.o. – nie obliczono

($A = 4,6$). Otrzymane wyniki, w związku z niemal losowym charakterem zmienności wzdłuż osi minimalnej zmienności parametrów, należy traktować z dużą nieufnością. Znacznie niższy, „łagodny” poziom anizotropii ($A = 1,6$), wyznaczono dla zawartości popiołu.

3.2. Regionalne semiwariogramy bezwzględne, kierunkowe zawartości popiołu

Już wstępna analiza wykresów indyktrisy zmienności zawartości popiołu (rys. 5) pozwoliła na sformułowanie poglądu, że zmienność parametru w węglu pokładu głównego w wyraźny sposób nawiązuje do tektonicznej struktury rowu Bełchatowskiego. Izolinie zmienności semiwariogramów dla większości obszarów wykazują wyraźne wydłużenie wzdłuż kierunku W-E (oś minimalnej zmienności zawartości popiołu). Jedynie w skrajnych fragmentach pola Bełchatów (obszary D1 i B3) oraz w najmniejszym powierzchniowo obszarze B2, kierunek minimalnej zmienności parametru odstępuje od powyższej prawidłowości, zmieniając się prawie o 90° i jest zbliżony do N-S (rys. 5). Dość charakterystyczna jest również „ewolucja” i dopasowanie kierunku minimalnej zmienności zawartości popiołu do przebiegu struktury bełchatowskiej. W zachodniej i centralnej części pola Bełchatów, kierunek minimalnej zmienności jest zbliżony do W-E (A1, A2, C, D2,). We wschodniej części wyraźnie dopasowuje się do skracającej ku południowi struktury rowu i można go zdefiniować na NWW-SEE (A3) (rys. 5).



Rys. 5. Izoliniowe wykresy wartości empirycznych semiwariogramów bezwzględnych, kierunkowych zawartości popiołu wydzielonych na obszarach pola Bełchatów

Fig. 5. Isoline, directional semivariograms charts of the ash content in the separated areas of the Bełchatów area

Otrzymane anomalne kierunki zmienności w skrajnie zachodnim obszarze D1 mogą się wiązać z zaburzeniami w stromo nachylonym pokładzie węgla spowodowanym bliskością halotektonicznej struktury wysadu Dębiny. Z kolei kierunek maksymalnej zmienności parametru w obszarze B2 (NEE-SWW), wydaje się być wypadkową zmiany kierunku strukturalnego rowu Bełchatowskiego z W-E (w części W pola Bełchatów) na NWW-SEE (w części E) oraz z sąsiedztwem (od zachodu) z obszarem stożków napływowych, w których dominującym kierunkiem transportu był NW i NE (Słomka i in. 2000).

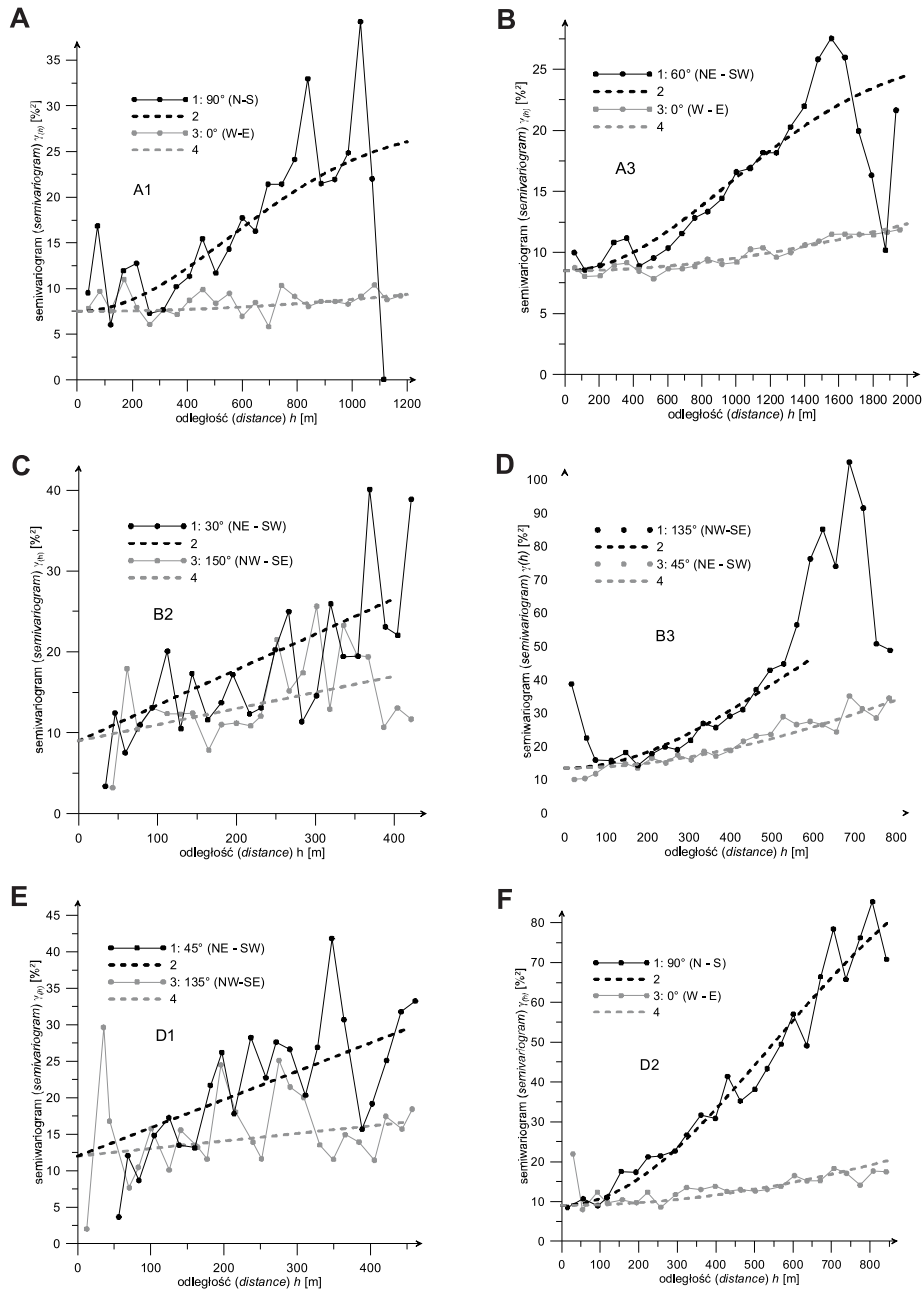
Wykresy bezwzględnych wartości semiwariogramów w funkcji kierunku obserwacji przedstawiono w jednej skali odległości i w zunifikowanej dla wszystkich obszarów skali wartości. Pozwoliło to na wstępne, relatywne rozpoznanie obszarów charakteryzujących się względnie dużym poziomem zmienności kierunkowej oraz tych, które można uznać za izotropowe. Na tym etapie badań, otrzymane wyniki pozwoliły na wysnucie wstępnych wniosków o wyraźnej względnej anizotropii w obrębie obszaru B3, C oraz D2 oraz o izotropowej zmienności zawartości popiołu w węglach z obszaru B1 (rys. 5).

Do wyznaczonych kierunków minimalnej i maksymalnej zmienności parametru, dopasowano geostatystyczne modele. W związku z brakiem dostatecznej ilości danych, już na wstępie zdecydowano o nie poddawaniu analizie kierunkowej obszarów A2, B1 oraz C. W pozostałych obszarach, w czterech przypadkach zastosowano modele Gaussa (A1, A3, B3 i D2), a w dwóch przypadkach modele liniowe (B2, D1) (rys. 6, tab. 4).

Analiza współczynników korelacji liniowej Pearsona pomiędzy faktycznymi poziomami zawartości popiołu w punktach opróbowania a wartościami wyestymowanymi za pomocą procedury krigingu punktowego (tab. 4) pozwala stwierdzić, że najlepsze efekty modelowania osiągnięto w obszarach: D2 ($r = 0,74$), A3 ($r = 0,59$) i B2 ($r = 0,56$). Wszystkie wymienione obszary sąsiadują ze sobą (rys. 5) i położone są we wschodniej i centralnej części pola Bełchatów, blisko tzw. strefy stożków napływowych (Słomka i in. 2000).

Analiza postaci semiwariogramów obliczonych kolejno dla kierunków minimalnej i maksymalnej zmienności zawartości popiołu pozwoliła na określenie (w zakresie prowadzonych obserwacji) rodzaju występującej anizotropii. We wszystkich analizowanych obszarach anizotropia wykazywała charakter zonalny.

Obliczone współczynniki anizotropii (tab. 5) wskazują, że z maksymalnym, ciężkim poziomem anizotropii mamy do czynienia w obszarze A1. Zasięgi autokorelacji semiwariogramów kierunkowych różniły się od siebie aż pięciokrotnie. Z nieco niższym poziomem parametru mamy do czynienia w przypadku obszaru D1. Współczynnik asymetrii wyliczony dla badanego obszaru wyniósł 3,7. Jego wartość co prawda wskazuje na istnienie wyraźnej anizotropii, ale jest zapewne efektem niemal losowej zmienności parametru wzdłuż kierunku minimalnej zmienności. Z podobnymi, średnimi wartościami współczynników anizotropii na poziomie odpowiednio 3,0 i 3,2 mamy do czynienia w obszarach A3 i D2. Anizotropię zmienności zawartości popiołu należy w nich uznać za wyraźną. Obszary B2 i B3 poza wskazywanymi wcześniej anomalnymi kierunkami anizotropii zmienności zawartości popiołu charakteryzują się także łagodnym charakterem anizotropii. Obliczone współczynniki anizotropii wynosiły dla nich odpowiednio: 2,2 i 1,8.



Rys. 6. Semiwariogramy bezwzględne, kierunkowe poziomej, regionalnej zmienności zawartości popiołu w obszarach: A1 (A), A3 (B), B2 (C), B3 (D), D1 (E) i D2 (F) (pole Bełchatów), równania modeli semiwariogramów znajdują się w tabeli 4, objaśnienia jak w rysunku 4

Fig. 6. Directional semivariograms of the horizontal, regional, variability of the ash content in separated areas: A1 (A), A3 (B), B2 (C), B3 (D), D1 (E) i D2 (F) (Bełchatów area), semivariogram models equations can be found in Table 4, explanations as in Fig. 4

TABELA 4

Geostatystyczne modele regionalnej, poziomej zmienności zawartości popiołu w węglu pokładu głównego w wydzielonych obszarach pola Bełchatów

TABLE 4

Geostatistical models of regional, horizontal variability of the ash content in separated areas the Bełchatów area

Obszar	Semiwariogram		Test krzyżowy $\bar{\varepsilon} / \sigma_{\varepsilon}$	Korelacja i regresja liniowa $z_i^0 = b_0 + b_1 \cdot z_{ki}^*$
	typ	model		
A1	BA _{min}	$\gamma(h) = 7,5 + 20,5 \text{ gauss (h/3900 m)}$	0,01/0,972	r = 0,47 b ₀ = 1,55 b ₁ = 0,83
	BA _{maks}	$\gamma(h) = 7,5 + 20,5 \text{ gauss (h/780 m)}$		
A3	BA _{min}	$\gamma(h) = 8,5 + 18,0 \text{ gauss (h/4091 m)}$	-0,029/0,947	r = 0,59 b ₀ = 0,92 b ₁ = 0,92
	BA _{maks}	$\gamma(h) = 8,5 + 18,0 \text{ gauss (h/1350 m)}$		
B2	BA _{min}	$\gamma(h) = 9,0 + 13,2 \text{ lin (h/660 m)}$	0,016/1,005	r = 0,56 b ₀ = 0,66 b ₁ = 0,95
	BA _{maks}	$\gamma(h) = 9,0 + 13,2 \text{ lin (h/300 m)}$		
B3	BA _{min}	$\gamma(h) = 13,5 + 70,0 \text{ gauss (h/1360 m)}$	-0,006/1,060	r = 0,42 b ₀ = 4,08 b ₁ = 0,74
	BA _{maks}	$\gamma(h) = 13,5 + 70,0 \text{ gauss (h/750 m)}$		
D1	BA _{min}	$\gamma(h) = 12,0 + 15,5 \text{ lin (h/1500 m)}$	0,035/0,980	r = 0,40 b ₀ = 3,59 b ₁ = 0,73
	BA _{maks}	$\gamma(h) = 12,0 + 15,5 \text{ lin (h/400 m)}$		
D2	BA _{min}	$\gamma(h) = 9,0 + 100,0 \text{ gauss (h/760 m)}$	-0,024/1,045	r = 0,74 b ₀ = 0,57 b ₁ = 0,97
	BA _{maks}	$\gamma(h) = 9,0 + 100,0 \text{ gauss (h/2450 m)}$		

Objaśnienia jak w tabeli 2

TABELA 5

Współczynniki anizotropii zmienności zawartości popiołu w obszarach pola Bełchatów

TABLE 5

Anisotropy ratio of the ash content from the separated areas of the Bełchatów area

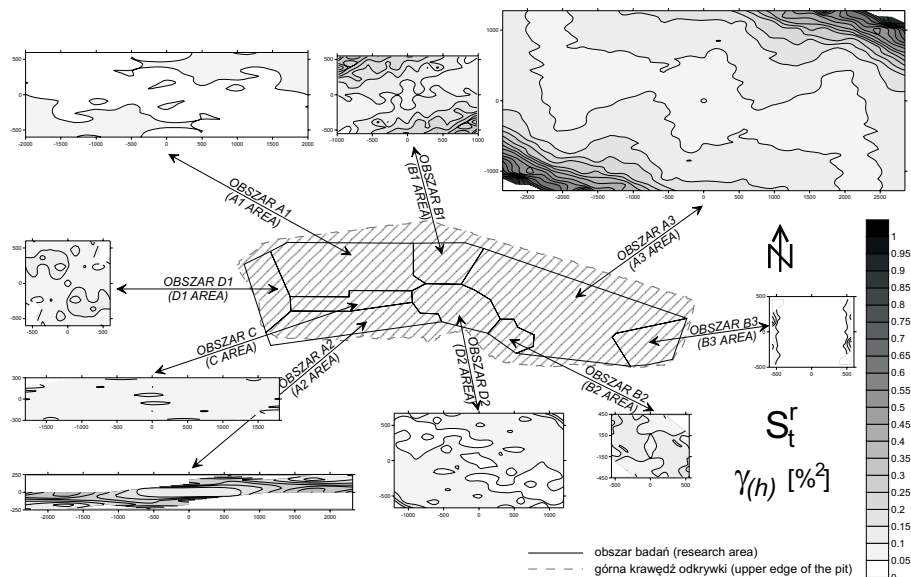
Obszar	R _{min} [m]	R _{maks} [m]	A [-]
A1	3 900,0	780,0	5,0
A2	n.o.	n.o.	n.o.
A3	4 091,0	1 350,0	3,0
B1	n.o.	n.o.	n.o.
B2	660,0	300,0	2,2
B3	1 360,0	750,0	1,8
C	n.o.	n.o.	n.o.
D1	1 500,0	400,0	3,7
D2	2 450,0	760,0	3,2

Objaśnienia jak w tabeli 3

3.3. Regionalne semiwariogramy bezwzględne, kierunkowe zawartości siarki całkowitej

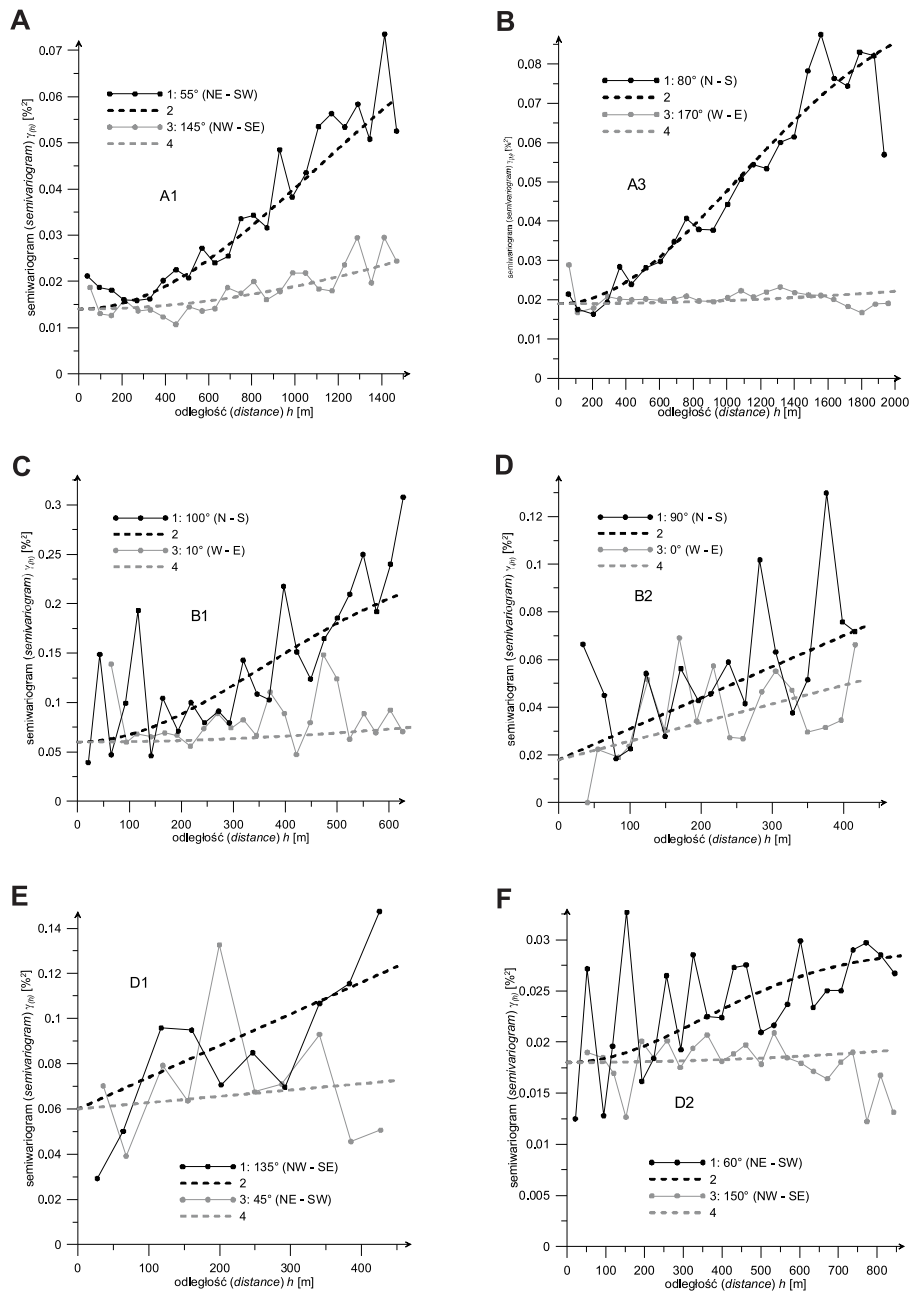
Podobnie jak w przypadku zawartości popiołu tak i tutaj, dla zawartości siarki całkowitej zmienność parametru w węglu pokładu głównego w wyraźny sposób nawiązywała do tektonicznej struktury rowu bełchatowskiego. Izolinie zmienności wartości semiwariogramów dla większości obszarów wykazywały wyraźne wydłużenie wzdłuż kierunku W-E (najczęstszy kierunek minimalnej zmienności parametru). Bardziej szczegółowa analiza wykazała, że w zachodniej i centralnej części pola Bełchatów, kierunek minimalnej zmienności jest zbliżony do W-E (A2, C). Natomiast we wschodniej, ale także w północno-zachodniej części pola, wyraźnie skręca ku północy zmieniając się na NWW-SEE (A1, A3, B3, D2) (rys. 7). Anomalne kierunki zmienności w skrajnie zachodnim obszarze D1, podobnie jak w przypadku zawartości popiołu, należy wiązać z zaburzeniami w stromo nachylonym pokładzie węgla spowodowanym obecnością w podłożu diapiru Dębiny. Analiza wykresów indyktryś zmienności parametru, pozwoliła na wysnucie wstępnych wniosków o wyraźnej anizotropii w obrębie obszaru A3 i B1 oraz o izotropowej zmienności parametru w węglach obszaru C.

Do wyznaczonych kierunków minimalnej i maksymalnej zmienności parametru, dopasowano geostatystyczne modele. W związku z brakiem dostatecznej ilości danych, już na wstępie zdecydowano o nie poddawaniu analizie kierunkowej obszarów A2, B3 oraz C. W pozostałych obszarach, w czterech przypadkach zastosowano modele Gaussa (A1, A3, B1 i D2), a w dwóch przypadkach modele liniowe (B2, D1) (rys. 8, tab. 6).



Rys. 7. Izoliniowe wykresy wartości empirycznych semiwariogramów bezwzględnych, kierunkowych zawartości siarki całkowitej w wydzielonych obszarach pola Bełchatów

Fig. 7. Isoline, directional semi-variograms charts of the sulfur content in the separated areas of the Bełchatów area



Rys. 8. Semiwariogramy bezwzględne, kierunkowe poziomej, regionalnej zmienności zawartości siarki całkowitej w obszarach: A1 (A), A3 (B), B1 (C), B2 (D), D1 (E) i D2 (F) (pole Bełchatów), równania modeli semiwariogramów znajdują się w tabeli 6, objaśnienia jak w rysunku 4

Fig. 8. Directional semivariograms of the horizontal, regional, variability of the sulfur content in separated areas: A1 (A), A3 (B), B1 (C), B2 (D), D1 (E) i D2 (F) (Bełchatów area), semivariogram models equations can be found in Table 6, explanations as in Fig. 4

Analiza współczynników korelacji liniowej Pearsona pomiędzy faktycznymi poziomami zawartości popiołu w punktach opróbowania a wartościami wyestymowanymi za pomocą procedury krigingu punktowego (tab. 6) pozwala stwierdzić, że najlepsze efekty modelowania osiągnięto w obszarach: A3 ($r = 0,75$), A1 ($r = 0,71$) i B1 ($r = 0,64$). Wszystkie wymienione obszary tworzą zasadniczą część pola Bełchatów (rys. 5) i położone są przy północnej krawędzi tej części rowu Kleszczowa.

TABELA 6

Geostatystyczne modele regionalnej, poziomej zmienności zawartości siarki całkowitej w węglu pokładów głównego w wydzielonych obszarach pola Bełchatów

TABLE 6

Geostatistical models of regional, horizontal variability of the sulfur content in separated areas the Bełchatów area

Obszar	Semiwariogram		Test krzyżowy $\bar{\varepsilon} / \sigma_{\varepsilon}$	Korelacja i regresja liniowa $z_i^0 = b_0 + b_1 \cdot z_{ki}^*$
	typ	model		
A1	BA _{min}	$\gamma_{(h)} = 0,014 + 0,077$ gauss (h/3875 m)	-0,002/0,989	$r = 0,71$ $b_0 = 0,03$ $b_1 = 0,94$
	BA _{maks}	$\gamma_{(h)} = 0,014 + 0,077$ gauss (h/1550 m)		
A2	BA _{min}	n.o.	n.o.	n.o.
	BA _{maks}	n.o.		
A3	BA _{min}	$\gamma_{(h)} = 0,019 + 0,080$ gauss (h/10000 m)	-0,011/1,036	$r = 0,75$ $b_0 = 0,02$ $b_1 = 0,97$
	BA _{maks}	$\gamma_{(h)} = 0,019 + 0,080$ gauss (h/1500 m)		
B1	BA _{min}	$\gamma_{(h)} = 0,060 + 0,190$ gauss (h/2250 m)	0,006/1,032	$r = 0,64$ $b_0 = 0,09$ $b_1 = 0,89$
	BA _{maks}	$\gamma_{(h)} = 0,060 + 0,190$ gauss (h/500 m)		
B2	BA _{min}	$\gamma_{(h)} = 0,018 + 0,052$ lin (h/660 m)	-0,043/1,236	$r = 0,47$ $b_0 = 0,15$ $b_1 = 0,80$
	BA _{maks}	$\gamma_{(h)} = 0,018 + 0,052$ lin (h/400 m)		
B3	BA _{min}	n.o.	n.o.	n.o.
	BA _{maks}	n.o.		
C	BA _{min}	n.o.	n.o.	n.o.
	BA _{maks}	n.o.		
D1	BA _{min}	$\gamma_{(h)} = 0,060 + 0,063$ lin (h/2250 m)	0,002/1,13	$r = -0,14$ $b_0 = 0,98$ $b_1 = -0,36$
	BA _{maks}	$\gamma_{(h)} = 0,060 + 0,063$ lin (h/450 m)		
D2	BA _{min}	$\gamma_{(h)} = 0,018 + 0,011$ gauss (h/2500m)	-0,029/0,936	$r = 0,35$ $b_0 = 0,15$ $b_1 = 0,75$
	BA _{maks}	$\gamma_{(h)} = 0,018 + 0,011$ gauss (h/500m)		

Objaśnienia jak w tabeli 2

Analiza postaci semiwariogramów obliczonych kolejno dla kierunków minimalnej i maksymalnej zmienności zawartości siarki całkowitej, pozwoliła na określenie występującego typu anizotropii. Należy stwierdzić, że we wszystkich badanych obszarach, w zakresie prowadzenia obserwacji, anizotropia miała charakter zonalny.

Analiza poziomu anizotropii wykazała, że obszarem o najwyższym poziomie parametru jest A3. Wyliczony współczynnik anizotropii wyniósł około 6,6 (tab. 7). Jego wartość wskazuje na wybitną, ciężką anizotropię zmienności parametru. Należy jednak zaznaczyć, że tak duża wartość współczynnika anizotropii jest w głównej mierze spowodowana niemal losowym rozkładem wartości parametru w kierunku minimalnej zmienności (W-E). Identyfikacyjnym i ciągle wysokim poziomem współczynnika anizotropii (4,5–5,0) cechowały się obszary B1, D1 i D2. Znacznie niższymi, ale wciąż wyraźnymi poziomami anizotropii cechowały się obszary A1 (2,5) oraz B2 (1,65).

TABELA 7

Współczynniki anizotropii zmienności zawartości siarki całkowitej w obszarach pola Bełchatów

TABLE 7

Anisotropy ratio of the sulfur content from the separated areas of the Bełchatów area

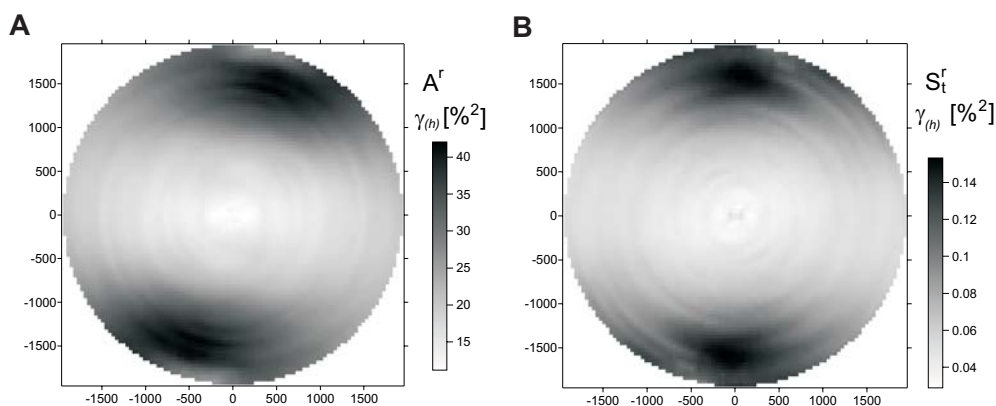
Obszar	R_{\min} [m]	R_{\max} [m]	A [-]
A1	3 875,0	1 550,0	2,50
A2	n.o.	n.o.	n.o.
A3	10 000,0	1 500,0	6,60
B1	2 250,0	500,0	4,50
B2	660,0	400,0	1,65
B3	n.o.	n.o.	n.o.
C	n.o.	n.o.	n.o.
D1	2 250,0	450,0	5,00
D2	2 500,0	500,0	4,50

Objaśnienia jak w tabeli 3

3.4. Generalne semiwariogramy bezwzględne, kierunkowe

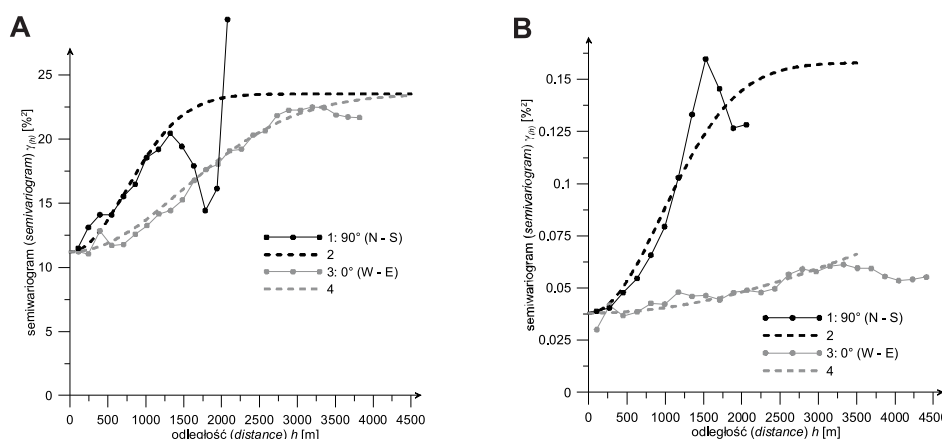
Do anizotropowej analizy całego obszaru pola Bełchatów wytypowano dwa najbardziej zmienne parametry węgla, tzn.: zawartość popiołu i zawartość siarki całkowitej. Na podstawie wykresów indyktryś zmienności parametrów (rys. 9) określono kierunki minimalnej i maksymalnej zmienności parametrów. Wynosiły one odpowiednio około 0° (W-E) dla kierunku najmniejszej zmienności i około 90° (N-S) dla kierunku maksymalnej zmienności parametrów. Otrzymany obraz jest zgodny z rozciągłością strukturalną Rowu Kleszczowa.

Dla kierunków maksymalnej i minimalnej zmienności parametrów wyznaczono semiwariogramy empiryczne, a następnie dopasowano do nich geostatystyczne modele (rys. 10, tab. 8). W przypadku zmienności zawartości popiołu, zaszła konieczność usunięcia części



Rys. 9. Izoliniowe wykresy wartości generalnych semiwariogramów bezwzględnych, kierunkowych zawartości popiołu (A) i zawartości siarki całkowitej (B) – pole Bełchatów

Fig. 9. Isoline directional semivariograms charts of the ash content (A) and sulfur content (B) from the Belchatów area



Rys. 10. Generalne semiwariogramy bezwzględne, kierunkowe zawartości popiołu (A) i siarki całkowitej (B) w polu Bełchatów, równania modeli semiwariogramów znajdują się w tabeli 8, objaśnienia jak w rysunku 4

Fig. 10. General, directional semivariograms of the horizontal, variability of the ash (A) and sulfur content (B) in Belchatów area, semivariogram models equations can be found in Table 8, explanations as in Fig. 4

zmienności całkowitej, za którą odpowiadał trend. Powierzchnię trendu aproksymowano automatycznie z zastosowaniem wielomianu potęgowego drugiego rzędu. Dla obu badanych parametrów zastosowano modele Gaussa.

Duże ilości danych biorących udział w analizach (ok. 2000 punktów) pozwoliły na bardzo dobre dopasowanie modeli. Odzwierciedla się to zarówno w wyjątkowo regularnych przebiegach semiwariogramów (rys. 10), poprawnych wynikach testów krzyżowych jak i wysokich wartościach współczynników korelacji liniowej Pearsona pomiędzy prawdziwymi wartościami parametrów w punktach opróbowania a wartościami wyestymowanymi

TABELA 8

Geostatystyczne modele generalnej, poziomej zmienności zawartości popiołu i siarki całkowitej w węglu pokładu głównego w polu Bełchatów

TABLE 8

Geostatistical models of general, horizontal variability of the ash and sulfur content in the Bełchatów area

Param.	Semiwariogram		Test krzyżowy $\bar{\varepsilon} / \sigma_{\varepsilon}$	Korelacja i regresja liniowa $z_i^0 = b_0 + b_1 \cdot z_{ki}^*$
	typ	model		
A^r	BA _{min}	$\gamma_{(h)} = 11,20 + 12,30 \text{ gauss (h/2100 m)}$	-0,002/0,965	$r = 0,70$ $b_0 = -1,11$ $b_1 = 1,09$
	BA _{maks}	$\gamma_{(h)} = 11,20 + 12,30 \text{ gauss (h/1050 m)}$		
S_t^r	BA _{min}	$\gamma_{(h)} = 0,038 + 0,12 \text{ gauss (h/6750 m)}$	-0,001/0,977	$r = 0,65$ $b_0 = -0,14$ $b_1 = 0,78$
	BA _{maks}	$\gamma_{(h)} = 0,038 + 0,12 \text{ gauss (h/1350 m)}$		

Objaśnienia jak w tabeli 2

z zastosowaniem przyjętych modeli (tab. 8). Analiza wykresów semiwariogramów pozwoliła ujawnić, że w skali całego pola Bełchatów anizotropia zmienności zawartości popiołu w węglu PG ma charakter geometryczny, a w przypadku zawartości siarki całkowitej – zonalny.

Na podstawie dopasowanych modeli, dla obu badanych parametrów obliczono współczynniki anizotropii (tab. 9). Otrzymane wyniki pozwalają stwierdzić, że w skali całego pola górniczego anizotropię zmienności zawartości popiołu należy uznać za łagodną bądź przeciętną, a w przypadku zawartości siarki całkowitej za ciężką.

TABELA 9

Współczynniki anizotropii zmienności zawartości popiołu i zawartości siarki całkowitej w polu Bełchatów na podstawie generalnych semiwariogramów bezwzględnych, kierunkowych

TABLE 9

Anisotropy ratio of the ash and sulfur content from the Bełchatów area calculated by the general, directional semivariograms

Parametr	R _{min} [m]	R _{maks} [m]	A [-]
A^r	2 100,0	1 050,0	2,0
S_t^r	6 750,0	1 350,0	5,0

Objaśnienia jak w tabeli 3

Podsumowanie

Przeprowadzone badania miały na celu określenie, czy struktura poziomej zmienności głównych parametrów jakości węgla w polu Bełchatów ma charakter izotropowy czy anizotropowy oraz ewentualne określenie poziomu anizotropii w skali lokalnej, niewielkiej odkrywki, w skali większych, genetycznie jednorodnych obszarów (o powierzchni do kilku km²), a także w skali całego pola górniczego. Rozpoznanie anizotropii jest typowym zagadnieniem z zakresu geologii górniczej i służy optymalizacji prac projektowych, dokumentacyjnych oraz robót górniczych. Dobre rozpoznanie anizotropii często pozwala na poprawę estymacji wartości parametrów złożowych pomiędzy węzłami sieci rozpoznawczej, a tym samym wspiera analizy zasobów złóż i pozwala na prowadzenie racjonalnej eksploatacji uwzględniającej zmienność parametrów kopaliny charakterystycznej dla różnych części złoża. Do oceny anizotropii zastosowano analizę geostatystyczną.

Na podstawie przeprowadzonych obszarowych i generalnych analiz zmienności zawartości popiołu i siarki całkowitej, należy stwierdzić wyraźny związek ich zmienności z równoleżnikową rozciągłością struktury rowu Kleszczowa. Wartości parametrów ulegają najwolniejszej zmianie wzdłuż kierunku równoległego do osi rowu (W-E), natomiast wzdłuż kierunku do niego prostopadłego (N-S) zmieniają się najszybciej. Wykresy zmienności wartości semiwariogramów zawartości popiołu i siarki całkowitej w funkcji odległości pomiędzy miejscami opróbowania i kierunku obserwacji wskazują na dopasowanie kierunku minimalnej zmienności powyższych parametrów do zmian osi struktury bełchatowskiej. W zachodniej części pola kierunek ten można zdefiniować na W-E, natomiast we wschodniej części na NWW-SEE (rys. 5, 7). Niektóre obszary (np. B3, D1) charakteryzują się większym lub mniejszym odstępstwem od tej reguły. Powodem występowania anomalnych struktur anizotropii mogą być różnego rodzaju zaburzenia serii złożowej spowodowane zróżnicowaną subsydencją dna rowu Kleszczowa, halotektoniką, glacitektoniką, neotektoniką, czy zaburzeniami natury sedymentacyjnej, przykładowo w obszarach stożków napływowych. W trakcie badań anizotropii w obszarach o podobnym typie sedymentacji osadów (analizy regionalne), ujawniło się zróżnicowanie poziomów anizotropii parametrów zależne od obszaru badań. Najwyraźniej jest to widoczne w analizie zawartości popiołu w węglu. Obszary o typach sedymentacji fitogenicznej bądź fitogeniczno-klastycznej cechują się wyraźnie wyższymi poziomami anizotropii zmienności parametru niż obszary o typie sedymentacji fitogeniczno-węglanowej (tab. 5). W przypadku zawartości siarki całkowitej, z powodu relatywnie wysokiego poziomu anizotropii parametru w obszarze B1 (tab. 7), powyższa prawidłowość nie jest już taka oczywista. Współczynniki anizotropii dla poszczególnych obszarów pola Bełchatów zmieniały się w zakresach: 1,8–5,0 (dla A') i 1,65–6,60 (dla S'_i). Z powodu małej ilości porównywanych obszarów nie udało się wykryć statystycznie istotnego związku korelacyjnego pomiędzy obszarowymi wartościami współczynników anizotropii zawartości popiołu i zawartości siarki całkowitej.

Podczas badań ujawniła się prawidłowość złożonego charakteru anizotropii, zależnego od zakresu prowadzonej obserwacji. W skali obszarów (analiza regionalna) charaktery-

styczną cechą semiwariogramów kierunkowych jest fakt zróżnicowania poziomów wariancji całkowitej ($C_0 + C$) w wykresach obliczonych dla maksymalnego i minimalnego kierunku zmienności danego parametru. Wskazuje to na istnienie anizotropii zonalnej. Prawidłowość można obserwować zarówno dla zawartości popiołu (rys. 6) jak i zawartości siarki całkowitej (rys. 8). Zonalny charakter zmienności zawartości siarki całkowitej potwierdza także analiza przeprowadzona w skali całego pola Bełchatów (analiza generalna) (rys. 10B). Tutaj także obserwujemy zjawisko wyraźnego zróżnicowania poziomów wariancji całkowitej. Zaskakujące efekty przyniosła analiza zmienności zawartości popiołu w skali generalnej. Semiwariogramy obliczone dla ekstremalnych kierunków zmienności parametru wykazują podobny poziom wariancji całkowitej, co wskazuje na geometryczny charakter anizotropii. Obserwowane zjawisko może być spowodowane nałożeniem się dwóch różnych zjawisk generujących anizotropię, które mogą być marginalizowane bądź uwypuklane w zależności od skali obserwacji. W skali regionalnej może dominować anizotropia związana z istnieniem lokalnych trendów zmienności badanych parametrów (np.: związanych z regionalnymi warunkami sedymentacji). W skali generalnej anizotropie regionalne mogą tracić na znaczeniu kosztem anizotropii powodowanej przez zjawiska wyższego rzędu (np.: generalnego kierunku transportu materiału klastycznego).

W części badanych obszarów semiwariogramy zmienności zawartości siarki całkowitej (rys. 8), rzadziej zawartości popiołu (rys. 6), obliczane wzdłuż osi minimalnej zmienności parametrów wykazywały struktury zbliżone do losowych.

Ważną część badań stanowiły analizy anizotropii przeprowadzone w skali niewielkiego obszaru o powierzchni 8 m^2 (pole doświadczalne). Badania wykazały, że nawet w przypadku tak niewielkiej skali obserwacji obecność anizotropii zmienności parametrów jest faktem. Pomimo ogólnie niewielkiego poziomu zmienności wykryto ją w przypadku aż trzech z wszystkich czterech badanych parametrów węgla. Parametrami zmiennymi anizotropowo (także w skali lokalnej) okazały się: zawartość popiołu, wartość opałowia i zawartość siarki całkowitej (rys. 4).

Stwierdzenie anizotropowej struktury zmienności parametrów jakościowych węgla uranianego w polu Bełchatów powinno wpływać na projektowanie i planowanie wydobywania. Kierunek postępu frontu eksploatacji w polu Bełchatów jest bezpośrednio związany z równoleżnikową rozciągłością złoża. Maksymalna zmienność parametrów węgla – która jest prostopadła do głównej osi struktury bełchatowskiej – wpływa na jakość węgla w strumieniu urobku i jest zależna od położenia koparek. Powyższe stwierdzenie ma duże znaczenie dla planowania operacyjnego wydobywania i powinno być uwzględniane przez odpowiednie służby kopalni.

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

LITERATURA

- Armstrong M., 1998 – Basic linear geostatistics. Berlin, Springer – Verlag.
- Bartuś T., 2005 – Statystyczne modele zmienności parametrów jakości węgla brunatnego w centralnej części złoża Bełchatów (praca doktorska). Kraków, AGH.
- Bartuś T., 2007 – Przyczynek do badań lokalnej, poziomej zmienności głównych parametrów jakości węgla brunatnego w centralnej części złoża Bełchatów. Analizy statystyczne. Kwartalnik AGH Geologia t. 33, z. 1, s. 89–107.
- Bartuś T., Słomka T., 2009 – Geostatystyczna estymacja parametrów jakości węgla brunatnego w polu Bełchatów wykorzystująca znajomość zmienności lokalnej. Gospodarka Surowcami Mineralnymi t. 25, z. 2, s. 5–22.
- Ciepliński A., Uberman R., 1995 – Wykorzystanie konwencjonalnych i geostatystycznych metod badania zmienności parametrów złożowych do projektowania, planowania eksploatacji złóż zaburzonych węgla brunatnego. [W:] Bednarczyk J., Uberman R., red. – Identyfikacja i modelowanie warunków zalegania oraz wybierania trudno urabialnych kompleksów geologicznych zaburzonych złóż węgla brunatnego. Wrocław, Poltegor – Instytut, s. 41–81.
- Czarnecki i in. 1992 – Czarnecki L., Frankowski R., Kuszneruk J., 1992 – Syntetyczny profil litostratygraficzny utworów trzeciorzędu złoża Bełchatów. Materiały XV Sympozjum „Geologia formacji węglonośnych Polski”, Kraków, s. 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, s. 92–103.
- Gotowała R., Hałuszczak A., 1999 – Pozycja i główne etapy młodoolpejskiego rozwoju rowu Kleszczowa w świetle badań mezostrukturalnych w odkrywcze 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, s. 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, s. 78–90.
- Isaaks E.H., Srivastava R.M., 1989 – An introduction to Applied Geostatistics. New York, Oxford, Oxford University Press.
- Kasiński J.R., 1984 – Tektonika synsedymencyjna jako czynnik warunkujący sedimentację formacji brunatnowęglowej w zapadliskach tektonicznych na obszarze zachodniej Polski. Przegląd Geologiczny t. 32, z. 5, s. 260–268.
- Kokesz Z., 2006 – Trudności i ograniczenia w geostatystycznym modelowaniu zmienności złóż i szacowaniu zasobów metodą krigingu. Gospodarka Surowcami Mineralnymi t. 22, z. 3, s. 5–20.
- Kokesz Z., Mucha J., 1983 – Zasady doboru wariogramu przy obliczaniu wielkości błędów ekstensji. Przegląd Geologiczny t. 31, z. 2, Warszawa, s. 83–90.
- Kokesz Z., Mucha J., 1984 – Anizotropia parametrów złożowych – cele i metody badania. Technika Poszukiwań Geologicznych t. 23, z. 2, s. 40–49.
- Matl K., 2000 – Wybrane elementy budowy geologicznej złoża Bełchatów. [W:] Słomka T., Wagner M., red. – Charakter petrograficzny i warunki sedimentacji wybranych kompleksów litologicznych z profilu miocenu w złożu węgla brunatnego Bełchatów. Prace Geologiczne PAN O. Kraków, nr 147, s. 11–19.
- Mucha J., 1991 – Wybrane metody matematyczne w geologii górniczej. Skrypty Uczelniane nr 1215. Kraków, Wydawnictwo AGH.
- Mucha J., 1994 – Metody geostatystyczne w dokumentowaniu złóż. Kraków, Wydawnictwo AGH.
- Namysłowska-Wilczyńska B., 2006 – Geostatystyka. Teoria i zastosowania. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, s. 356.
- Nieć M., 1990 – Geologia kopalniana. Wydawnictwa. Geologiczne, Warszawa, s. 504.
- Naworyta W., 2008 – Analiza zmienności parametrów złożowych węgla brunatnego pod kątem sterowania jakością strumienia urobku. Gospodarka Surowcami Mineralnymi t. 24, z. 2/4, s. 97–110.

- Słomka i in. 2000 – Słomka T., Doktor M., Wagner M., Matl K., 2000 – Sedimentologiczne studium mioceńskich stożków napływowych w złożu węgla brunatnego Bełchatów. [W:] Słomka T., Wagner M., red. – Charakter petrograficzny i warunki sedimentacji wybranych kompleksów litologicznych z profilu miocenu w złożu węgla brunatnego Bełchatów. Prace Geologiczne PAN O. Kraków, nr 147. Kraków, IGSMiE PAN, s. 21–45.
- Surfer 8. User's Guide, 2002, Golden Software, Inc., Colorado, s. 640.
- Wagner M., 2000 – Petrografia i praktyczne znaczenie paratonsteinów ze złoża węgla brunatnego Bełchatów. [W:] Słomka T., Wagner M., red. – Charakter petrograficzny i warunki sedimentacji wybranych kompleksów litologicznych z profilu miocenu w złożu węgla brunatnego Bełchatów. Prace Geologiczne PAN O. Kraków, nr 147. Kraków, IGSMiE PAN, s. 101–122.
- Wysokiński L., Zapaśnik T., 1984 – Poligeniczność tektonicznego rowu Kleszczowa. Technika Poszukiwań Geologicznych t. 23, z. 2, s. 2–6.

ANIZOTROPIA ZMIENNOŚCI GŁÓWNYCH PARAMETRÓW JAKOŚCI WĘGLA BRUNATNEGO W POLU BEŁCHATÓW

Słowa kluczowe

Złoże węgla brunatnego Bełchatów, parametry jakości węgla, anizotropia, geostatystyka, modele kierunkowe, semiwariogramy kierunkowe

Streszczenie

Złoże węgla brunatnego Bełchatów położone jest w centralnej Polsce w rowie tektonicznym Kleszczowa. Jest podzielone na szereg części, którym odpowiadają pola górnicze: Kamieńsk (wschodnia część złoża), Bełchatów (centralna część złoża) i Szczerców (zachodnia część złoża). Obszarem prezentowanych badań było pole Bełchatów. Przedmiotem badań była zależność lokalnej, regionalnej i generalnej, horyzontalnej zmienności wybranych parametrów technologiczno-chemicznych węgla w stanie roboczym (wilgoci całkowitej, zawartości popiołu i zawartości siarki całkowitej), w funkcji kierunku obserwacji. Zastosowano geostatystyczny opis zmienności parametrów złożowych za pomocą semiwariogramów.

Badania, które były prowadzone w różnych skalach obserwacji (od zmienności lokalnej w obrębie tzw. pola doświadczalnego o rozmiarach 8×8 m, w wydzielonych większych jednorodnych częściach pola Bełchatów – tzw. obszarach, aż po analizy generalne w skali całego pola górniczego). Wykazały one istnienie wyraźnej anizotropii zmienności parametrów węgla. Struktura anizotropii obserwowana w skalach regionalnej i globalnej nawiązuje do przebiegu struktury bełchatowskiej. Szczegółowe badania wskazują na zróżnicowany poziom anizotropii obserwowany w różnych obszarach pola Bełchatów. Nie udało się udowodnić zależności zmienności poziomu anizotropii zawartości popiołu i siarki całkowitej od środowisk sedimentacji pokładu głównego węgla w różnych częściach pola Bełchatów. Oba badane parametry cechują się silnym bądź średnim poziomem anizotropii w badanych obszarach. Anizotropia ujawnia się także w skali lokalnej. Badania wykazały, że w skali regionalnej przeważa anizotropia typu zonalnego. W skali całego złoża, zawartość siarki całkowitej wykazywała anizotropię typu zonalnego, a zawartość popiołu – typu geometrycznego.

ANISOTROPY OF THE MAIN LIGNITE PARAMETERS VARIABILITY OF BEŁCHATÓW AREA

Key words

Bełchatów lignite deposit, qualitative lignite parameters, anisotropy, geostatistics, directional models, directional semivariograms

Abstract

Bełchatów lignite deposit is located in the central part of Poland in the tectonic Kleszczów graben. It is divided into several parts, which are mining fields: Kamięńsk area (eastern part of the deposit), Bełchatów area (central part of the deposit) and Szczerców area (western part of the deposit). The subject of this study was the Bełchatow area. The main issue of the investigations was the dependence of local, regional and global, horizontal variability of selected lignite qualitative parameters (moisture, ash content, calorific value and sulfur content in the as received state) is a function of viewing direction. There was applied the geostatistical analysis of the lignite variability parameters with use of semivariograms.

The researches which were conducted at different scales of observation: in the locale scale – in small field size 8×8 m called experimental area (local analysis), in larger homogeneous separated parts of the Bełchatow area (regional analysis) and in the whole Bełchatów area scale (general analysis). The results proved the visible anisotropy of variability mine lignite parameters. Anisotropy structure observed in regional and global scale is connected with tectonic structure of the Bełchatów Graben. The detailed studies show the varied level of anisotropy observed in different areas of Bełchatów field.

However, no dependence of the relative level of ash and total sulfur content anisotropy on the environment of sedimentation of the main coal deposit in different parts of the Bełchatów field has been observed. Both parameters characterize with strong or medium anisotropy level in examined fields. Moreover, anisotropy is also visible in the local scale. Conducted researches confirmed the thesis that zonal anisotropy is prevalent kind of anisotropy in the regional scale. In the range of the whole deposit the total sulfur content showed zonal anisotropy, whereas the ash content revealed geometric anisotropy.