

**KRIGING BLOKOWY ORAZ METODY GIS  
W GEOSTATYSTYCZNYM SZACOWANIU  
METANONOŚNOŚCI  
W KOPALNIACH WĘGLA KAMIENNEGO**

**BLOCK KRIGING AND GIS METHODS  
IN GEOSTATISTICAL MODELING OF METHANE GAS  
CONTENT IN COAL MINES**

**Henryk Badura<sup>1</sup>, Jarosław Zawadzki<sup>2</sup>, Piotr Fabijańczyk<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Wydział Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej w Gliwicach

<sup>2</sup>Wydział Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej

**Słowa kluczowe: GIS, metody geostatystyczne, metanonośność, kriging blokowy, zagrożenie metanowe w kopalniach, górnictwo węgla**

**Keywords: GIS, geostatistical methods, Coal Bed Methane content, block kriging, methane threat in mines, coal mining**

## **Wstęp**

Metan wydzielany do atmosfery kopalnianej powoduje szereg zagrożeń, które związane są głównie z możliwością wystąpienia pożaru lub wybuchu. W Polsce w ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat odnotowano liczne wypadki spowodowane wybuchem metanu. W ostatnich latach katastrofy górnicze miały miejsce w takich kopalniach jak Halemba, Borynia czy Wujek. Zagrożenie metanowe zwiększa się wraz z narastającą głębokością prowadzenia eksploatacji, czego powodem jest wyczerpywanie się zasobów węgla na mniejszych głębokościach. Obecnie 21 polskich kopalń zalicza się do metanowych.

Kopalnie różnią się między sobą strumieniem objętości metanu wydzielającym się do atmosfery kopalnianej (metanowością wentylacyjną). Strumień metanu, który jest wydzielany do atmosfery kopalnianej może wynosić od kilku do 150 m<sup>3</sup>/min w jednej kopalni.

Część metanu, która występuje w złożu węglowym, jest ujmowana systemem odmetanowania. Sumaryczny strumień metanu, który wydzielają się do atmosfery kopalnianej oraz jest odprowadzany przez system odmetanowania, nazywany jest metanowością absolutną lub całkowitą. Metanowość całkowita waha się w czasie w szerokim przedziale, co utrudnia gospodarce wykorzystanie metanu ujmowanego systemem odmetanowania jako nośnika energii.

Zapobieganie zagrożeniu metanowemu polega przede wszystkim na dostarczeniu do wyrobisk odpowiedniej ilości powietrza, co pozwala zmniejszyć stężenie metanu poniżej wartości dopuszczalnej. W przypadku, gdy ilość wydzielającego się metanu do wyrobisk jest zbyt duża i nie można jej rozcieńczyć do stężeń dopuszczalnych przez przepisy bezpieczeństwa, jego część może być ujmowana do systemu rurociągów i odprowadzana na powierzchnię (Frączek, 2005). W Polsce tematyką zapobiegania zagrożeniu metanowemu zajmuje się między innymi Zakład Odmetanowania Kopalń. Tę część metanu można utylizować jako gaz opałowy w kotłach, turbinach lub silnikach napędzających generatory prądu elektrycznego.

Przed przystąpieniem do eksploatacji węgla konieczne jest przeprowadzenie prognozy metanowości absolutnej, która jest sumą strumienia metanu wydzielającego się do wyrobisk oraz ujętego systemem odmetanowania. Podstawową daną wejściową dla prognozy jest metanonośność rozumiana jako wartość średnia ilość metanu zawarta w określonej części pokładu w kształcie prostokąta, przy czym jeden z boków jest równoległy do przyszłej ściany eksploatacyjnej, a jego długość jest równa długości ściany. Wartość średnia metanonośności jest obliczona najczęściej jako średnia arytmetyczna z pomiarów wykonanych w obrębie rozpatrywanego prostokąta (Krause i Łukowicz, 2000). Nie są więc wykorzystywane metody pozwalające na uwzględnienie przestrzennego charakteru zjawiska metanonośności.

W niniejszym artykule przedstawiono możliwości wykorzystania technik GIS oraz metod geostatystycznych do prognozowania średniej metanonośności określonego bloku pokładu węglowego.

## Badany obszar

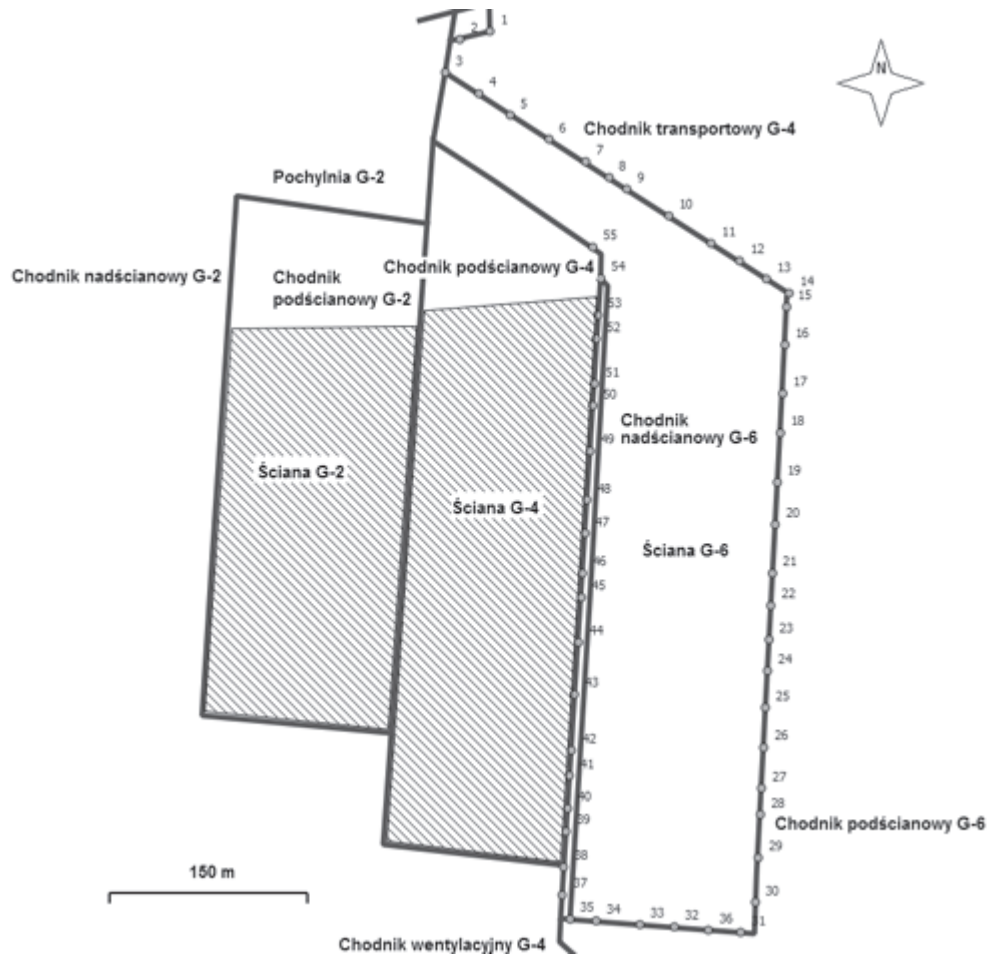
Pomiary metanonośności wykonane zostały dla pola ściany G-6, której dokładne usytuowanie zostało przedstawione na rysunku 1. Pole ściany G-6 jest położone pod miastem Jastrzębie-Zdrój, w jednej z kopalń Jastrzębskiej Spółki Węglowej S.A. Grubość pokładu węglowego w polu ściany G-6 zawierała się w przedziale od 1,94 do 2,35 m. Pokład jest nachylony pod kątem wynoszącym od 7 do 13°.

Pokład węglowy ściany G-6 pokryty jest warstwą o grubości od 0 do 1,1 m łupków ilastych, zapiaszczonych z laminami węgla. Ponad tą warstwą znajduje się warstwa o grubości od 15,0 do 18,5 m piaskowca drobnoziarnistego, przechodzącego w łupek piaszczysty. Wyżej położone warstwy to łupek ilasty o grubości do 0,7 m oraz pozabilansowy pokład węgla o grubości od 0,15 do 0,50 m.

Poniżej pokładu, w którym jest zlokalizowane pole ściany G-6, występuje warstwa łupka szarego o grubości 0,40 do 1,45 m, a poniżej tej warstwy występuje nieoznaczona warstwa węgla o grubości od 0,3 do 0,5 m. Pod tą warstwą zalega łupek piaszczysty o grubości od 6,60 do 15,40 m.

W obrębie badanej ściany G-6 stwierdzono kilka zaburzeń pokładu węglowego. W odległości od 180 do 190 m od chodnika transportowego G-4 stwierdzono w chodniku podścianowym G-6 serię małych uskoków o zrzutach od 0,1 do 0,3 m, natomiast w odległości od 490 do 540 m stwierdzono nagłe obniżenie pokładu. W trakcie eksploatacji ściany, w sąsiedztwie obniżenia stwierdzono uskoki o zmiennym zrzucie od 0,8 przez 0,25 do 1,2 m. W powierzchni ścianowej nie stwierdzono zaburzeń tektonicznych.

W chodniku nadścianowym G-6 stwierdzono, mierząc od powierzchni ścianowej G-6, w odległości 40 do 80 m, serię uskoków o zrzutach od 0,1 do 0,25 m, w odległości 130 m



Rys. 1. Lokalizacja poboru prób do badania metanonośności

uskok o zrzućie 0,4 m, w odległości 240 m uskoku o zrzućie 0,25 m, a w odległości 536 m uskoku o zrzućie 2,2 m. Obserwowane zaburzenia pokładu węglowego związane są bezpośrednio z występowaniem stref podwyższonej metanonośności. Ponadto znaczne zróżnicowanie metanonośności w obrębie pola ściany G-6 jest też warunkowane przeszłą eksploatacją w pokładach położonych wyżej. Część południowo-zachodnia pola ściany G-6 znajduje się w filarze ochronnym dla obiektów położonych na powierzchni obszaru górniczego. W miejscu tym nie była prowadzona eksploatacja węgla, w rezultacie w tej części pokładu nie doszło do tak silnej degazacji pokładu.

## **Materiały i metody**

### **Pomiary metanoności**

W Polsce podstawową metodą określania metanoności jest metoda bezpośrednia (Kozłowski, 1972; Diamond, Levine, 1981; Australian Standard AS 3980, 1991; Mavor i in., 1994; 1996; Diamond, Schatzel, 1998), opracowana w Kopalni Doświadczalnej „Barbara”, będącej oddziałem Głównego Instytutu Górnictwa w Katowicach (Pawiński i Roszkowski, 1985, Rozporządzenie Ministra Gospodarki, 2002). W ramach tej metody przeprowadza się pomiary zarówno w kopalni, jak i w wyspecjalizowanym laboratorium. Procedury wykonywane w kopalni obejmują: 1) pobranie próby zwiercinowej w przodku drążonego w pokładzie węglowym wyrobiska korytarzowego, 2) wykonanie pomiaru ciśnienia atmosferycznego, temperatury i stężenia metanu w powietrzu w miejscu pobierania próby, 3) pomiar wskaźnika desorpcji  $\Delta p_2$ .

Próbę pobiera się wierząc z przodku wyrobiska otwór w pokładzie węgla do strefy równowagi sorpcyjnej. Część zwiercin umieszcza się w naczyniu stalowym. Druga część zwiercin jest wykorzystywana do pomiaru wskaźnika desorpcji  $\Delta p_2$ . Czas pobierania i przygotowania prób zwiercinowych wynosi 2 minuty. Po dwóch minutach hermetycznie zamyka się próbę w stalowym naczyniu, a drugą próbę w desorbometrze różnicowym. Wydzielający się do desorbometru gaz z umieszczonej w nim próby węglowej tworzy nadciśnienie, którego wartość odczytuje się na skali desorbometru po upływie dwóch minut. Wartość tego nadciśnienia jest wskaźnikiem desorpcji  $\Delta p_2$ .

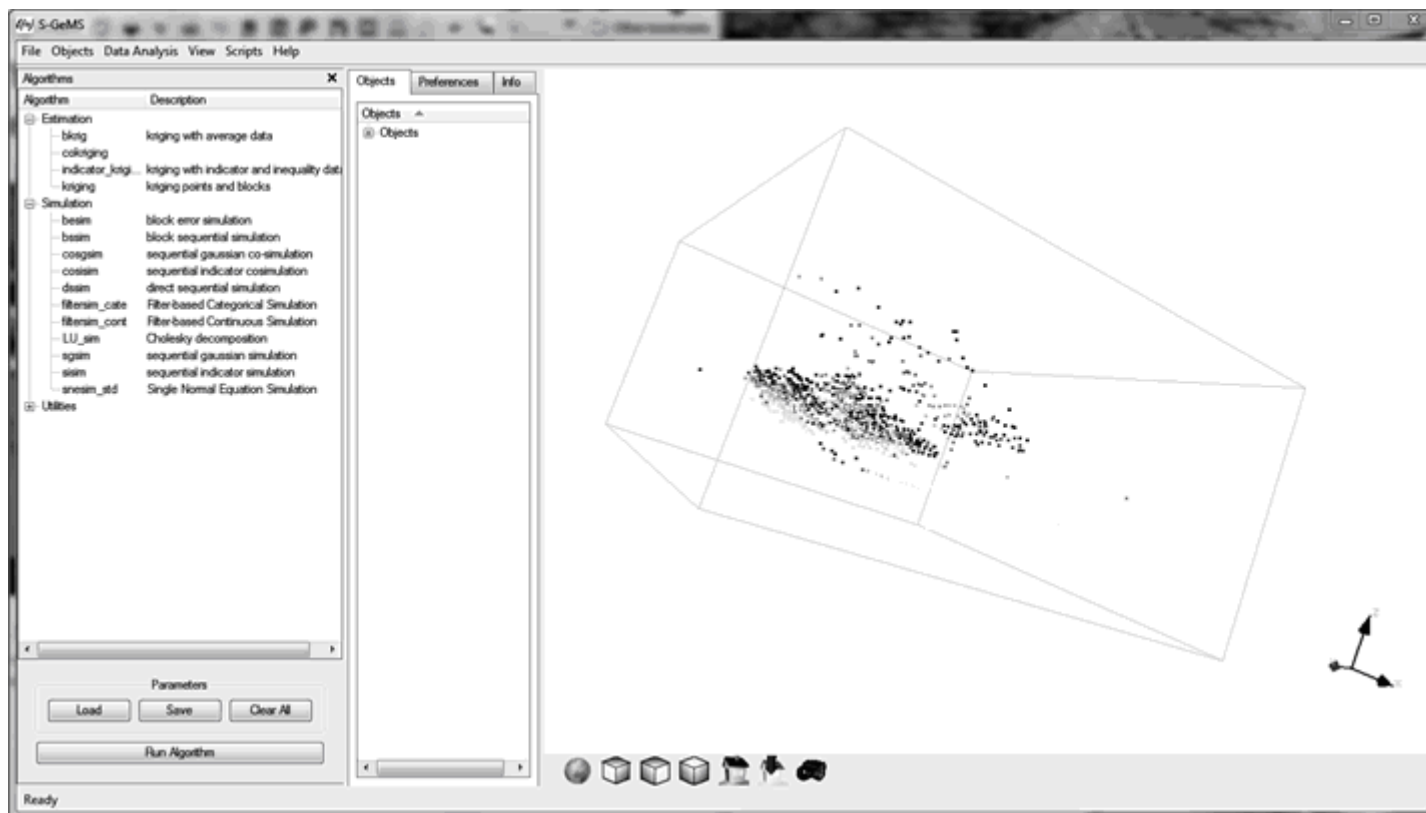
Próbę zamkniętą w naczyniu stalowym poddaje się w laboratorium mieleniu i określa się ilość metanu, która była zawarta w próbce. Na podstawie opracowanych w KD „Barbara” tablic, określa się ilość metanu, która wydzielila się w trakcie dwóch minut od rozpoczęcia pobierania próby do zamknięcia w naczyniu.

W laboratorium określa się także: wilgotność próby węglowej, porowatość, zawartość popiołu oraz zawartość części lotnych. Suma metanu zawartego w próbce oraz metanu wydzielonego w trakcie pobierania próby, przeliczona na czystą substancję węglową jest ilością sorbowanego metanu w próbce. Znając zawartość części lotnych oraz ilość sorbowanego metanu, określa się ciśnienie równowagi sorpcyjnej. Z kolei na podstawie pomiaru porowatości próby węglowej i ciśnienia równowagi sorpcyjnej określa się ilość metanu wolnego w miejscu pobrania próby. Do tej pory nie został określony błąd metody.

Badaniem metanoności pokładów i sporządzaniem prognoz metanowości zajmują się w Polsce wyspecjalizowane laboratoria, posiadające uprawnienia rzeczoznawcy do spraw ruchu zakładu górniczego nadawane przez Prezesa Wyższego Urzędu Górniczego.

### **Metody geostatystyczne**

W pracy wykorzystane zostały wybrany metody geostatystyczne w połączeniu z wykorzystaniem oprogramowania GIS. Obliczenia były wykonywane w programie SGeMS (Remy et al., 2008).



Rys. 2. Interfejs programu SGeMS

Zmienność przestrzenna metanoności zbadana została przy wykorzystaniu klasycznego wariogramu izotropowego (Goovaers, 1997; Isaaks, Srivastava, 1989). Wykonane zostały wariogramy eksperymentalne oraz ich modele. Wartości semiwariancji  $\gamma(\mathbf{h})$  wyznaczone zostały według wzoru:

$$\gamma(\mathbf{h}) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [Z(\mathbf{x}_i) - Z(\mathbf{x}_i + \mathbf{h})]^2,$$

gdzie:  $N$  – liczba pomiarów,  $Z(\mathbf{x}_i)$  – zmierzona wartość metanoności w punkcie  $\mathbf{x}_i$ ,  $\mathbf{h}$  – wektor separacji.

Rozkłady przestrzenne metanoności wyznaczone zostały przy wykorzystaniu krigingu blokowego (Webster, Oliver, 2007), gdzie wartości  $Z_{est}(\mathbf{x})$  są estymowane we wcześniej zdefiniowanych blokach, na podstawie wartości zmierzonych pomnożonych przez wagi krigingu  $w_i$ :

$$Z_{est}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N w_i \cdot Z(\mathbf{x}_i)$$

Wagi krigingu są wyliczane przy wykorzystaniu funkcji semiwariancji tak, aby średni błąd estymacji  $E[Z_{est}(\mathbf{x}) - Z(\mathbf{x})]$  był równy 0, a wariancja  $Var[Z_{est}(\mathbf{x}) - Z(\mathbf{x})]$  była minimalna.

## Rezultaty i dyskusja

### Pomiary i zmienność przestrzenna metanoności

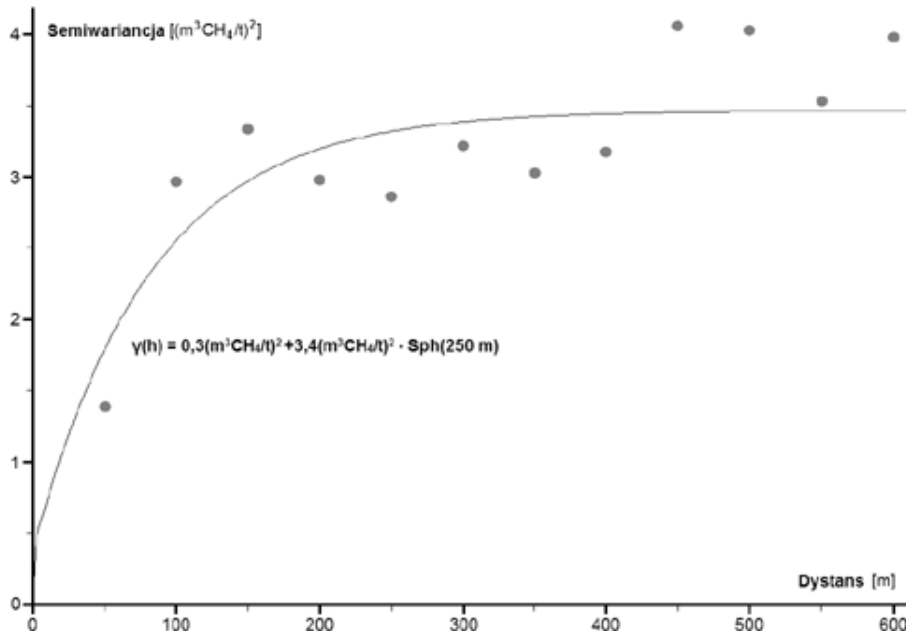
W chodnikach podścianowym G-4 i G-6 oraz w chodniku transportowym G-4 (rys. 1) pobrano łącznie 55 próbek, na podstawie których określono wartość metanoności. Opisowe statystyki metanoności zamieszczone zostały w tabeli 1.

Średnia wartość metanoności w ścianie G-6 wynosiła  $4,52 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{t}$ , zaś maksymalna  $9,45 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{t}$ . Rozkład wartości metanoności charakteryzowała niewielka skośność, a jego kształt był zbliżony do rozkładu normalnego. Najczęściej spotykane wartości metanoności zawierały się w przedziale od 3 do  $4 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{t}$ .

**Tabela 1.** Statystyki opisowe metanoności zmierzonej w ścianie G-6

Metanoność w ścianie G-6	$[\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{t}]$
Średnia	4,52
Mediana	4,01
Odchylenie standardowe	1,78
Skośność	0,42
Rozstęp	8,06
Minimum	1,39
Maksimum	9,45
Liczebność	55

W kolejnym etapie wykonany został wariogram izotropowy (pary punktów zliczane są bez względu na kierunek wektora, który tworzy para punktów). Model wariogramu charakteryzował efekt samorodka wynoszący  $0,3 (\text{m}^3\text{CH}_4/\text{t})^2$ . Na jego podstawie wnioskować można, że błąd (uwzględniający błędy pomiarowe, błędy wynikające z rozmieszczenia punktów pomiarowych) wynosił  $0,55 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{t}$  (pierwiastek z efektu samorodka). Nasycenie wariogramu wynosiło  $3,4 (\text{m}^3\text{CH}_4/\text{t})^2$ . Mały stosunek efektu samorodka do wartości nasycenia wariogramu świadczy o tym, że błędy te nie są duże i nie wpływają w znacznym stopniu na otrzymany rozkład przestrzenny.



Rys. 3. Wariogram eksperymentalny oraz jego model metanoności zmierzonej w ścianie G-6

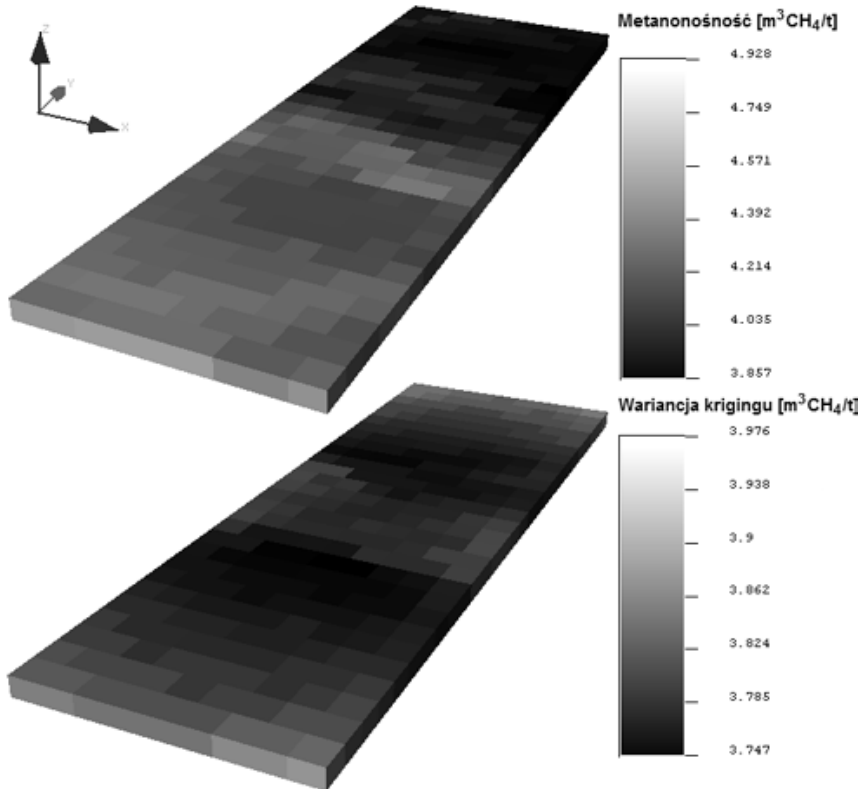
Układ punktów pomiarowych, wynikający z układu chodników, miał pewien wpływ na wyznaczanie wariogramu eksperymentalnego. Zliczanie par punktów wartości metanoności odbywało się dla wektora separacji  $h$  równego 50 m. Ze względu na szerokość ściany G-6, wynoszącą około 150 m, pierwsze 3 klasy par punktów obejmowały praktycznie wartości metanoności zmierzone wzdłuż jednego chodnika. Jedynie w miejscu gdzie chodnik podścianowy G-4 i chodnik transportowy G-4 biegną równoległe, odległość 150 m była wystarczająca, aby do tej klasy zaliczone zostały wartości metanoności zmierzone w sąsiednich chodnikach. Dopiero dla klas, dla których odległość par punktów pomiarowych wynosiła 150 i więcej metrów, zaliczane były punkty z różnych chodników.

Pomimo nietypowego układu punktów pomiarowych widać wyraźnie, że zasięg korelacji wariogramu metanoności (rys. 3) wynosił około 250 m, co oznacza, że pomiary metanoności wykazują zależność przestrzenną na tak długim dystansie.

### Rozkłady przestrzenne metanoności w ścianie G-6

Rozkłady przestrzenne metanoności wykonany został metodą kriginu blokowego dla bloków o rozmiarze: 30×30 m. Analogiczny rozmiar bloków został wykorzystany w przypadku wyznaczenia wariancji kriginu oraz rozkładów przestrzennych odchyłeń standardowych kriginu metanoności.

Na podstawie wyznaczonego rozkładu metanoności zaobserwować można, że w badanej ścianie G-6 wyróżnia się dwa podobszary (rys.4). Pierwszy z nich obejmuje początkowy fragment ściany, położony bliżej chodnika transportowego G-4, ciągnący się mniej więcej do połowy długości ściany. W fragmencie tym obserwowano niższe wartości metanono-



**Rys. 4.** Rozkłady przestrzenne metanonośności oraz wariancji kriginu blokowego w badanej ścianie G-6 dla bloku o rozmiarze 30×30 m; trzeci wymiar, nie uwzględniony w estymacji, został dodany do rysunku w celu zobrazowania grubości pokładu węglowego

śności, mieszczące się praktycznie w zakresie do  $4 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{t}$ . W drugim fragmencie ściany obserwowano wyższe wartości metanonośności, wynoszące od 4 do  $5 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{t}$ .

W rezultacie wykorzystanie kriginu blokowego umożliwiło wyznaczenie estymacji zawartości metanonośności w badanej ścianie G-6, z uwzględnieniem przestrzennego charakteru zjawiska. Istotne jest także, że sumaryczna wartość błędów, związanych z rozmieszczeniem punktów pomiarowych, poborem prób oraz z błędami pomiarowymi i aparaturowymi reprezentowana jest przez efekt samorodka i potem uwzględniona w metodzie kriginu. Dotychczasowe metody szacowania metanonośności oparte były jedynie na metodach wyznaczania zwykłych średnich arytmetycznych w wybranych blokach. W związku z tym trudne jest określenie błędów estymacji.



## Wnioski

Wykorzystanie kriginu blokowego umożliwiło precyzyjne określenie, oprócz średnich, również zawartości metanonośności w blokach, z uwzględnieniem aspektu przestrzennego badanej wielkości. W badanej ścianie G-6 stwierdzono wartości metanonośności mieszczące się w zakresie od 3,83 do 5,00 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/t. Wartości odchyłeń standardowych kriginu wynosiły od 3,75 do 3,98 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/t.

Estymacja metodami kriginu blokowego wymaga dokładnego wyznaczenia wariogramów metanonośności wzdłuż różnych kierunków. Tymczasem metanonośność jest mierzona głównie wzdłuż chodników ograniczających badaną ścianę, co powoduje zmniejszenie dokładności estymacji przestrzennej w części środkowej ściany. W przyszłości, w celu zwiększenia precyzji szacowania metanonośności, planowane jest wykorzystanie metod kokriginu oraz dodatkowych pomiarów uzupełniających, takich jak wskaźnik desorpcji.

## Literatura

- Australian Standard AS 3980, 1991: Guide to the determination of desorbable gas content of coal seams-direct method, North Sydney, NSW.
- Diamond, W.P., Levine, J.R., 1981: Direct Method Determination of the Gas Content of Coal: Procedures and Results, Report of Investigations 8515, United States Department of the Interior, Bureau of Mines, Washington, D.C.
- Diamond W.P., Schatzel S.J., 1998: Measuring the gas content of coal: A review.
- Frączek R., 2005: Zwalczanie zagrożenia metanowego w kopalniach węgla kamiennego. Gliwice.
- Goovaerts P., 1997: Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Oxford University Press, New York.
- Isaaks E.H., Srivastava R.M., 1989: An introduction to applied geostatistics. Oxford University Press, New York.
- Kozłowski B., 1972: Prognozowanie zagrożenia metanowego w kopalniach węgla kamiennego. Wyd. Śląsk, Katowice.
- Krause E., Łukowicz K., 2000: Dynamiczna prognoza metanowości bezwzględnej ścian. Wyd. GIG, Katowice – Mikołów.
- Mavor, M.J., Pratt, T.J., Britton, R.N., 1994: Improved Methodology for Determining Total Gas Content, Volume I. Canister Gas Desorption Data Summary, Gas Research Institute Report No. GRI-93/0410, Chicago, Illinois.
- Mavor, M.J., Pratt, T.J., Nelson, C.R. Casey, T.A., 1996: Improved Gas-In-Place Determination for Coal Gas Reservoirs, Paper SPE 35623, Proceedings of SPE Gas Technology Symposium.
- Pawiński J., Roszkowski J., 1985: Wydzielanie metanu do wyrobisk w chodnikach drażonych w węglu przy zastosowaniu kombajnów. Archiwum Górnictwa, t. 30 z. 2.
- Remy N., Boucher A., Wu J., 2008: Applied geostatistics with SGeMS. Cambridge University Press, New York.
- Webster R., Oliver M.A., 2007: Geostatistics for environmental scientists. Wiley, England.

## Abstract

*This paper presents the possibilities of using GIS techniques in determining average methane content of coal longwall with regard to spatial aspects of investigated phenomenon. This takes into account spatial location of the performed measurement and use of geostatistical methods to estimate the value of the coal bed methane with regard to estimation error. Spatial distributions of coal bed methane estimated by block kriging allowed to determine interval estimation of coal bed methane in the longwall. Estimation errors have been determined on the basis of the kriging variance, which takes into account both the total impact of errors arising from the specific distribution of measurement points and measurement errors.*

*The SGeMS (Stanford Geostatistical Modeling Software) software was used developed at the Stanford University. This software makes it possible to perform geostatistical calculations also in 3D space, which is important in the study of phenomena related to mining, because of the importance of all three coordinates of the Cartesian system.*

*In addition, the use of information about methane measurements, together with full information on their position (3D) allows the study of spatial variation in 3D and the subsequent use of that information in modeling. This methodology allows exploiting full spatial information as compared to two-dimensional situations.*

dr inż. Henryk Badura  
henryk.badura@polsl.pl  
32-237-28-96

prof. nzw. dr inż. Jarosław Zawadzki  
j.j.zawadzki@gmail.com  
22-234-7891

dr inż. Piotr Fabijańczyk  
p.fabijanczyk@gmail.com  
22-234-7891