



Trzeci wymiar geologii złoża rud miedzi

Mateusz Twardowski^{1,2}, Wojciech Kaczmarek¹, Robert Rożek¹



M. Twardowski

W. Kaczmarek

R. Rożek

The third dimension of the geology of copper ore deposit. *Prz. Geol.*, 68: 886–893; doi: 10.7306/2020.37

Abstract. The issue of three-dimensional geological modelling of stratoidal copper and silver ore deposit in the Fore-Sudetic Homocline has been the subject of hot discussions for many years. Formation of a single layer of deposit body can suggest the ease of interpretation of its form and structure, putting into question the need of three-dimensional visualization. The problem of building and updating a model is directly related to the production scale of KGHM Polska Miedź S.A. which is held over an area of 495 km² with an annual progression of around 480 km of underground workings in three mines, which also includes additional exploration of the deposit body. An

important step in the time-consuming 3D geological modelling process is the appropriate selection of previously prepared data and the spatial dimension for the target model - in accordance with its intended purpose. The process of 3D geological modelling, currently carried out at KGHM Polska Miedź S.A., can be divided into two related steps: structural modelling and grade modelling. The components of structural models are used in the grade modelling process, acting as a set of geological constraints during the grade estimation process. The products of both steps find practical application in many processes in a mining company.

Keywords: 3D geological modelling, structural models, grade models, copper ore deposit, KGHM Polska Miedź S.A.

U podstaw efektywnej działalności przedsiębiorstwa górniczego leży informacja geologiczno-złożowa. Precyzja określania parametrów ilościowych i jakościowych eksploatowanych lub przeznaczonych do przyszłej eksploatacji złóż wpływa nie tylko na przewidywane wielkości produkcji górniczej, ale również na szeroko rozumiane plany inwestycyjne i zagadnienia giełdowe. Podstawą decyzji są informacje o jak największej wiarygodności i najlepszej dokładności. Zobrazowanie budowy geologicznej złoża, określenie geologicznych parametrów kopaliny oraz szacowanie wolumenów przyszłej produkcji niejednokrotnie polegają na pewnym uproszczonym odwzorowaniu rzeczywistej formy złoża. Taki schematyczny obraz budowy złoża nazywamy modelem geologicznym. Geologiczny model złoża jest tworzony z wykorzystaniem metod matematycznych i doświadczalnych. Obrazowanie służy uproszczeniu złożoności modelowanego zjawiska i pomaga w jego wizualizacji, zrozumieniu i właściwej interpretacji (Mucha, 1994, 2001; Nieć i in., 1999; Kokesz, 2006; Mucha, Wasilewska-Błaszczuk, 2009, 2010; Pactwa, 2009; Mucha i in., 2010; Leszczyński, 2011; Nieć, 2012; Naworyta, 2017; Sermet i in., 2017; Wasilewska-Błaszczuk i in., 2017; Niedbał i in., 2019). W zależności od potrzeb stosuje się różne formy modeli geologicznych, od prostych schematów przedstawiających parametry złożowe w postaci map izoliniowych oraz modeli matematycznych, do skomplikowanych, ale i coraz bardziej popularnych modeli trójwymiarowych. Każda z wymienionych form modelu

geologicznego jest właściwa, jeśli pozwala na pozyskanie wiarygodnej i poprawnej informacji o złożu w wymaganym zakresie (Naworyta, 2017).

Analiza korzyści płynących z zastosowania nowoczesnych metod modelowania złóż w przemyśle surowcowym sprawiła, iż w 2014 r. w KGHM Polska Miedź S.A. podjęto decyzję o realizacji projektu, którego celem było wdrożenie do użytku narzędzi umożliwiających sporządzanie modeli geologicznych 3D, które miały zastąpić dotychczas stosowane metody, eliminując ich wady i pozwalając na lepsze obrazowanie budowy geologicznej złoża rud miedzi na potrzeby bieżących procesów – w tym, kluczowy dla prowadzenia racjonalnej gospodarki – proces planowania produkcji górniczej. Zdecydowano się na rozpoczęcie współpracy z firmą *Datamine Software* zarówno w zakresie zakupu oprogramowania do modelowania, jak i wsparcia podczas prac wdrożeniowych.

MODEL GEOLOGICZNY 3D W KGHM POLSKA MIEDŹ S.A. – CZY TO POTRZEBNE I MOŻLIWE?

Pionierskie opisy budowy geologicznej złoża rud miedzi na monoklinie przedsudeckiej możemy odnaleźć w licznych wydawnictwach. W pierwszym dziesięcioleciu od chwili odkrycia podstawowe prace opublikowali o nim m.in.: Wyżykowski (1958), Oberc (1962), Tomaszewski (1962), Kłapciński (1964a, b), Konstantynowicz (1964a, b),

¹ KGHM Polska Miedź S.A., ul. M. Skłodowskiej-Curie 48, 59-301 Lubin; Mateusz.Twardowski@kghm.com; Wojciech.Kaczmarek@kghm.com; Robert.Rozek@kghm.com

² AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Krasoń (1964), Nieć (1964), Rydzewski (1964), Harańczyk (1966) i Salski (1968). W pierwszej dokumentacji geologicznej złoża rud miedzi na monoklinie przedsudeckiej F. Ekiert napisał, że ma ono: *formę pokładową o zmiennej miąższości od 29 cm do kilkunastu metrów, obserwuje się także i zmienność w nasileniu mineralizacji kruszcowej, [...]jakkolwiek mineralizacja kruszcowa objęła różne litologiczne warstwy, które w różnym stopniu zostały zmineralizowane, to jednak w generalnym ujęciu należy podkreślić, że zmienność obserwowana na tym złożu, które wstępnie zostało poznane na przestrzeni około 170 km², jest stosunkowo nieznaczna i złożę to, pomijając zagadnienie tektoniki, wykazuje dużą regularność* (Wyżykowski, 1959). Treść tejsze charakterystyki serii złożowej mogła sugerować brak potrzeby szczegółowego modelowania trójwymiarowego bryły złożowej o tak nieskomplikowanej strukturze.

Plaskie modelowanie budowy geologicznej złoża rud miedzi na monoklinie przedsudeckiej przez wiele lat wystarczało do prowadzenia podstawowych procesów planowania i rozliczania produkcji górniczej. Modelownie 2D wspierało również procedury dokumentowania zasobów i szacowania parametrów złoża na potrzeby wykonywania ewidencji zasobów złoża (Leszczyński, 2011). Z czasem jednak konieczność efektywnego sterowania produkcją górniczą (w obszarze złożowym o powierzchni ok. 495 km², w którym rocznie wykonuje się ok. 480 km wyrobisk) wymusiła postęp technologiczny w zakresie wdrożenia wydajnych narzędzi wspomagających zarządzanie złożem.

Zapotrzebowanie na precyzyjną i wiarygodną informację zdecydowało, że w połowie lat 90. XX w. w kopalniach KGHM *Polska Miedź S.A.* podjęto pierwsze próby sporządzania modeli geologicznych 3D oraz ich wykorzystania w procesach produkcyjnych. W ramach prac rozwojowych przeanalizowano zagadnienie modelowania trójwymiarowego, wskazywano zalety i wady poszczególnych metod oraz wykonano próby porównywania i wyboru narzędzi informatycznych, które spełniałyby wymagania stawiane przez służby geologiczne przedsiębiorstwa. W docelowym rozwiązaniu, o którym zdecydowano w 2014 r., szczególną wagę nadano efektywności zarządzania dużym zbiorem danych oraz skuteczności aktualizacji modelu geologicznego, tak aby decyzje gospodarcze były podejmowane na podstawie aktualnej i wiarygodnej informacji geologicznej, przetwarzanej i generowanej z modelu.

ZBIÓR DANYCH GEOLOGICZNYCH DO MODELOWANIA GEOLOGICZNEGO

Poprawna selekcja oraz weryfikacja danych wejściowych do modelowania geologicznego stanowi jeden z najbardziej istotnych kroków w całym procesie. Istotne jest, aby zbiór danych wejściowych był odpowiednio przygotowany i zweryfikowany, gdyż dobra jakość danych wpływa bezpośrednio na minimalizowanie ryzyka błędnego zobrażenia budowy złoża w modelu oraz dokonania nieprawidłowej interpretacji.

Dane wykorzystywane w procesie modelowania złoża rud miedzi KGHM *Polska Miedź S.A.* pochodzą z kilku źródeł. Niezależnie od ich formatu i pochodzenia ważne jest, aby były to dane aktualne i wiarygodne. Rewizja danych jest procesem absolutnie koniecznym, gdyż niezależnie od przyjętych standardów i form zapewniania jakości danych źródłowych nie można wykluczyć obecności

błędów ludzkich. Inne, poważne nieścisłości mogą się pojawiać także w zbiorach danych, które powstały w różnym – często odległym – czasie.

W 60-letniej praktyce geologicznej KGHM *Polska Miedź S.A.* kilkakrotnie modyfikowano, aktualizowano i wdrażano nowe sposoby opisywania wydzielen litologicznych (Kaczmarek i in., 2014). W tym czasie zmieniały się również techniki i metody laboratoryjne oznaczania pierwiastków w próbkach geologicznych, często wiążące się z poprawą dokładności oznaczeń, a sporadycznie ze zmianą jednostek miary. Tego typu problemy muszą być poprawnie rozwiązane przed przystąpieniem do właściwego procesu budowania modelu.

Najważniejszymi źródłami danych wejściowych do przeprowadzenia procedur modelowania 3D złoża użytkowanego przez KGHM *Polska Miedź S.A.* jest Baza Danych Geologicznych (BDG) oraz Centralny Zasób Mapowy (CZM). Struktury danych są jednolite we wszystkich zakładach górniczych, co pozwala na tworzenie wspólnego standardu mechanizmów integracyjnych oraz algorytmów budowy modeli geologicznych za pomocą odpowiedniego oprogramowania. Baza Danych Geologicznych (BDG) jest podstawowym źródłem danych, zawiera rezultaty opróbowania geologicznego wraz z wynikami oznaczeń laboratoryjnych. Jest to relacyjna baza danych, w której są przechowywane dane próbek cząstkowych (odcinkowych), pobieranych w wyrobiskach górniczych oraz dane geologiczne uzyskane w trakcie wykonywania otworów wiertniczych z powierzchni terenu i z wyrobisk górniczych (Kaczmarek i in., 2014). Zbiory danych w BDG dotyczą zarówno opróbowania archiwalnego, jak i wykonywanego podczas bieżącej eksploatacji. Centralny Zasób Mapowy (CZM) służy publikacji i udostępnianiu górniczych map numerycznych sporządzanych w oddziałach spółki. Odpowiednie służby inżynierskie, obecne w strukturze zakładów górniczych, udostępniają w ramach CZM aktualne materiały kartograficzne przedstawiające sytuację geologiczno-górnica.

PROCES TWORZENIA GEOLOGICZNEGO MODELU 3D ZŁOŻA RUD MIEDZI W POLSCE

Proces modelowania geologicznego 3D złoża rud miedzi, realizowany obecnie w KGHM *Polska Miedź S.A.*, można podzielić na dwa powiązane ze sobą etapy:

- budowa modelu strukturalnego złoża;
- budowa modelu jakościowego złoża.

Składowe modelu strukturalnego stanowią fundament do budowy finalnego modelu jakościowego złoża, czyli modelu parametrów jakościowych złoża. Produkty obu etapów znajdują zastosowanie w wielu podstawowych procesach związanych z działalnością przedsiębiorstwa górniczego.

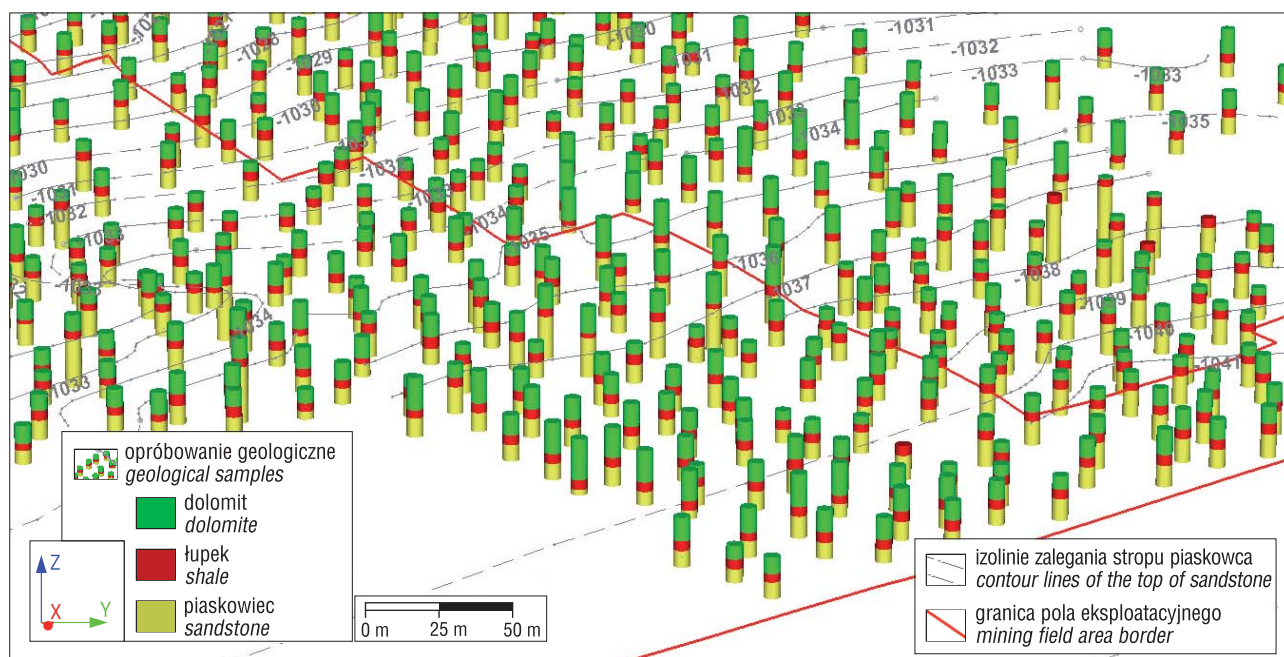
MODEL STRUKTURALNY ZŁOŻA RUD MIEDZI

Model strukturalny obrazuje budowę geologiczną złoża. Na kompletny model strukturalny składają się modele: głównych typów litologicznych (seria węglanowa – W, seria łupkowa – L, seria piaskowcowa – P), szczegółowych typów litologicznych oraz granic złoża wyznaczonych na podstawie zdefiniowanych kryteriów brzeżnych (Ustawa, 2011; Rozporządzenie Ministra Środowiska, 2015).

Stosowany od wielu lat podział miedzionośnych utworów cechsztyńskich na trzy główne typy litologiczne rud obejmuje serię okruszczonych piaskowców białego spagowca, czarnych łupków miedzionośnych oraz najstarszych utworów węglanowych cyklotemu Werra. Względy technologiczne sprawiły, iż ten podstawowy podział okazał się niedoskonały i niewystarczający. Na bazie wieloletnich doświadczeń opracowano słownik obejmujący 16 szczegółowych wydziałów litologicznych (Kaczmarek i in., 2017). Granice pomiędzy tymi wydziałami litologicznymi są uwzględniane w procesie tworzenia strukturalnego modelu złoża. Niemniej istotne jest umiejscowienie po-

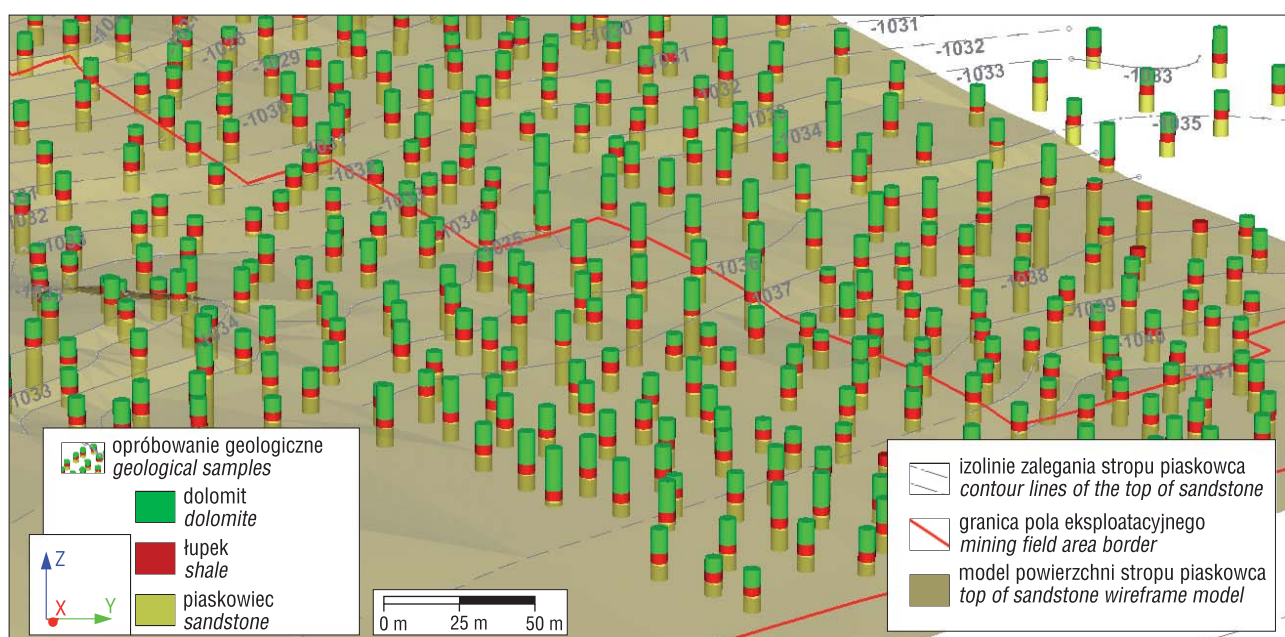
łożenia bryły złożowej w przestrzeni. Najbardziej istotną płaszczyzną referencyjną w obszarze złożowym Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego (LGOM) jest powierzchnia stropu białego spagowca (na granicy utworów czerwonego spagowca i cechsztynu), której głębokość zalegania jest dokładnie mierzona metodami geodezyjnymi.

Model strukturalny, budowany etapowo, wykorzystuje podstawową informację o sekwencji litologicznej rud, importowaną z BDG, oraz trójwymiarową mapę izoliniową głębokości zalegania stropu białego spagowca, prowadzoną w strukturze CZM (ryc. 1).



Ryc. 1. Prezentacja opróbowania geologicznego złoża rud miedzi w wybranym obszarze modelowania. Szarym kolorem wykreślono szkic 3D izolunii zalegania stropu białego piaskowca. Czerwona obwiednia jest granicą pola eksploatacyjnego

Fig. 1. Presentation of geological sampling for a copper ore deposit in a modelling area. Grey colour represents a 3D sketch of the top of the Weissliedent. The red border represents the exploitation field area



Ryc. 2. Model strukturalny – strop serii piaskowcowej w granicach pola eksploatacyjnego oraz w jego otoczeniu

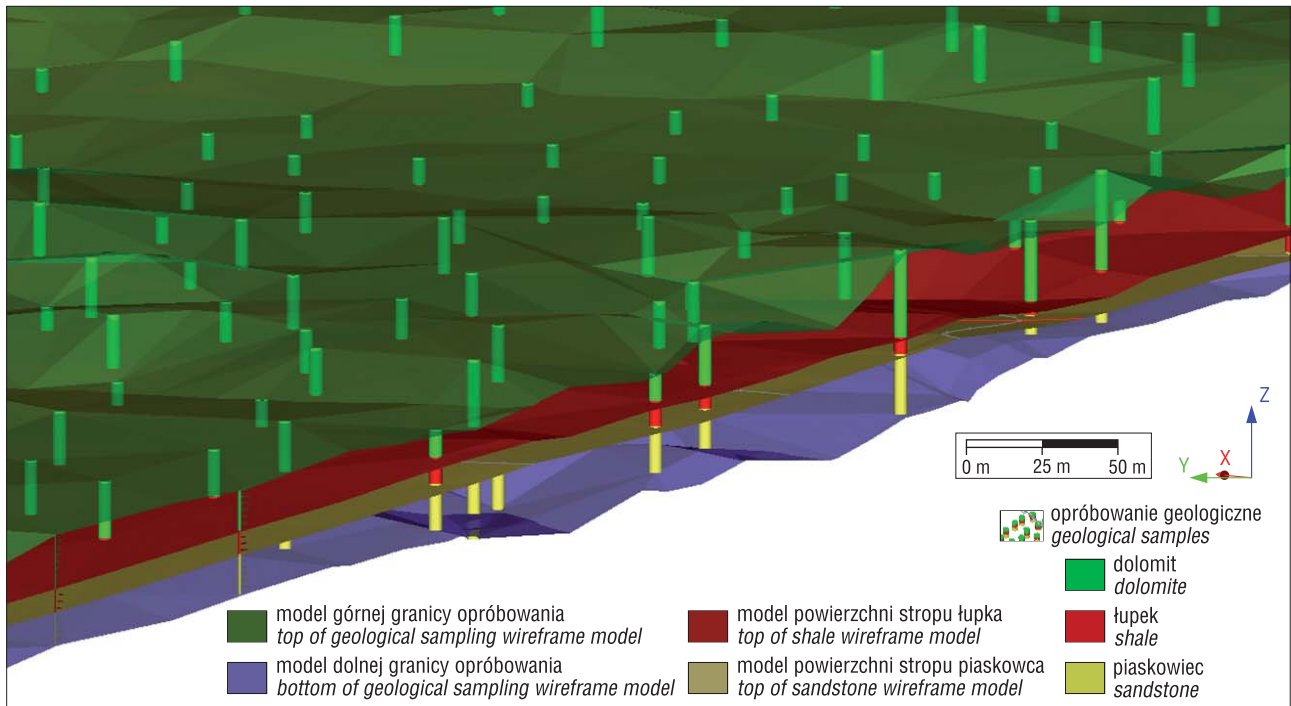
Fig. 2. Structural model – top of sandstones within the limits of the exploitation field area and its surroundings

Izolinie importowane z mapy cyfrowej umożliwiają modelowanie powierzchni stropu piaskowca (metodami triangulacji). Płaszczyzna ta stanowi granicę referencyjną dla kolejnych kroków modelowania litologicznego (ryc. 2).

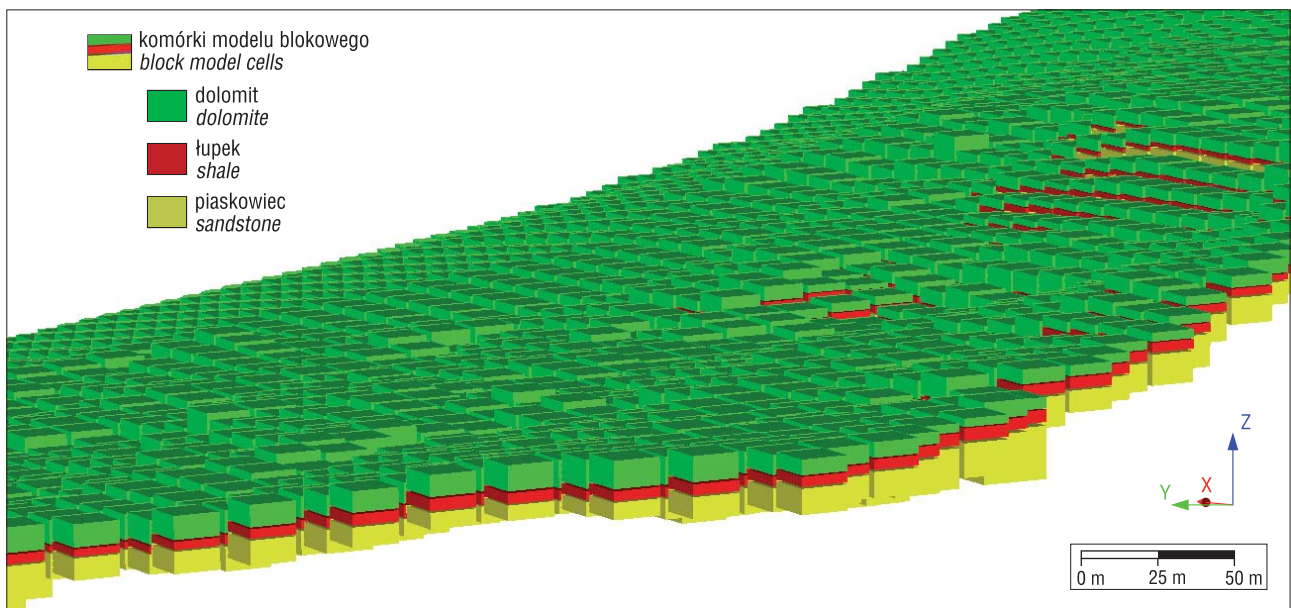
Dane dotyczące miąższości poszczególnych typów litologicznych rud, pozyskane poprzez geologiczne opróbowanie złoża, wraz z adnotacjami o położeniu przestrzennym powierzchni stropu piaskowca umożliwiają modelowanie granic kolejnych, następujących po sobie, szczegółowych lub głównych typów litologicznych skał złożowych. Informacje te służą do generowania powierzchniowych modeli

szkieletowych (ryc. 3). Pionowe granice modelu litologicznego są definiowane przez pionowy zasięg opróbowania. Dolna i górna granica modelu może zostać przesunięta w sytuacji, gdy konieczne jest odwzorowanie większego interwału skały otaczającej, np. na potrzeby dokładniejszego prognozowania zubożenia urobku.

Przestrzenie powstałe pomiędzy wygenerowanymi powierzchniami obrazującymi granice wydzielen litologicznych są wypełniane komórkami tworzącymi model blokowy, o wymiarze poziomym ustalonym przez geologa wykonującego model (ryc. 4). Wymiar ten, dobierany zależ-

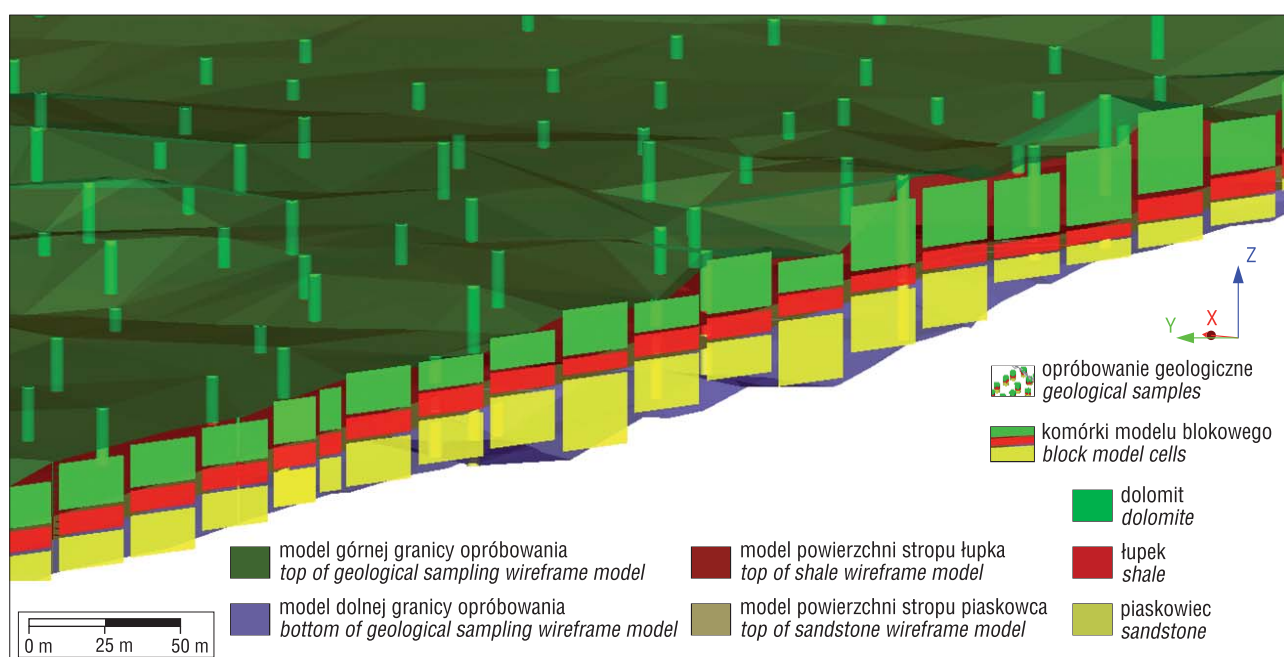


Ryc. 3. Przekrój przez model strukturalny – granice głównych typów litologicznych rud miedzi
Fig. 3. Cross-section through the structural model – main lithological wireframes



Ryc. 4. Model strukturalny – główne typy litologiczne rud. Obrazowanie modelu blokowego w granicach pola eksploatacyjnego oraz w jego otoczeniu

Fig. 4. Structural model – main lithological types. Block model of main lithological types within the exploitation field area and its surroundings



Ryc. 5. Przekrój przez model strukturalny – główne typy litologiczne rud. Model powierzchni obrazujących granice głównych typów litologicznych rud miedzi wraz z modelem blokowym

Fig. 5. Cross-section through structural model – main lithological types. Wireframes and block model as a representation of the main lithological types

nie od zamierzonego zastosowania modelu, często koreponduje z siatką opróbowania istniejącą w modelowanym obszarze. Pionowy wymiar komórki modelu jest automatycznie dopasowywany przez oprogramowanie komputerowe, zgodnie z miąższością rudy występującej w przestrzeni pomiędzy płaszczyznami granicznymi (ryc. 5).

Matematyczna skuteczność zastosowanej metody modelowania została potwierdzona przez porównanie z wynikami obliczeń metodą interpolacyjną krigingu liniowego oraz metodą symulacyjną *Pluri-Gaussian* (Wasilewska-Błaszczuk i in., 2017). Dzięki zastosowaniu metod geostatystycznych uzyskano bardzo zbliżoną dokładność prognozowania przebiegu granic wydzielen litologicznych i zbliżone względne błędy oszacowania.

Technika budowania modelu strukturalnego szczegółowych wydzielen litologicznych jest analogiczna do modelowania głównych typów litologicznych. W celu wykonania modelu strukturalnego są generowane płaszczyzny (w formie modeli szkieletowych) oddzielające od siebie te odmiany skał, których obecność została stwierdzona w modelowanym obszarze. Przestrzeń powstała pomiędzy utworzonymi granicami jest wypełniana komórkami modelu blokowego. Przygotowany model blokowy umożliwia wizualizację wykształcenia bryły złożowej, co ma znaczenie użytkowe ze względu na potrzebę stałego śledzenia zmian miąższości poszczególnych wydzielen litologicznych (ryc. 6). Każdej komórce modelu jest przypisywany zestaw atrybutów, takich jak miąższość, typ wydzielenia litologicznego czy prognozowana gęstość objętościowa, które są przydatne do wykonywania analiz statystycznych i wizualnych zestawień parametrów złoża w formie wykresów i map.

Przykłady praktycznych zastosowań strukturalnego modelowania typów litologicznych rud miedzi można mnożyć, a ich katalog nie został dotąd zamknięty (Kacz-

marek i in., 2017). Obecnie efekty pracy nad modelami litologicznymi są wykorzystywane w procesach:

- modelowania kształtu i przebiegu elewacji stropu białego spągowca i innych zjawisk geologicznych (ryc. 6);
- modelowania wyrobisk górniczych i ich położenia w przestrzeni;
- modelowania domen geologicznych o zbliżonych właściwościach przerobczych;
- modelowania zasięgu występowania skał skłonných do tąpnięć;
- modelowania właściwości fizykomechanicznych skał, np. gęstości objętościowej.

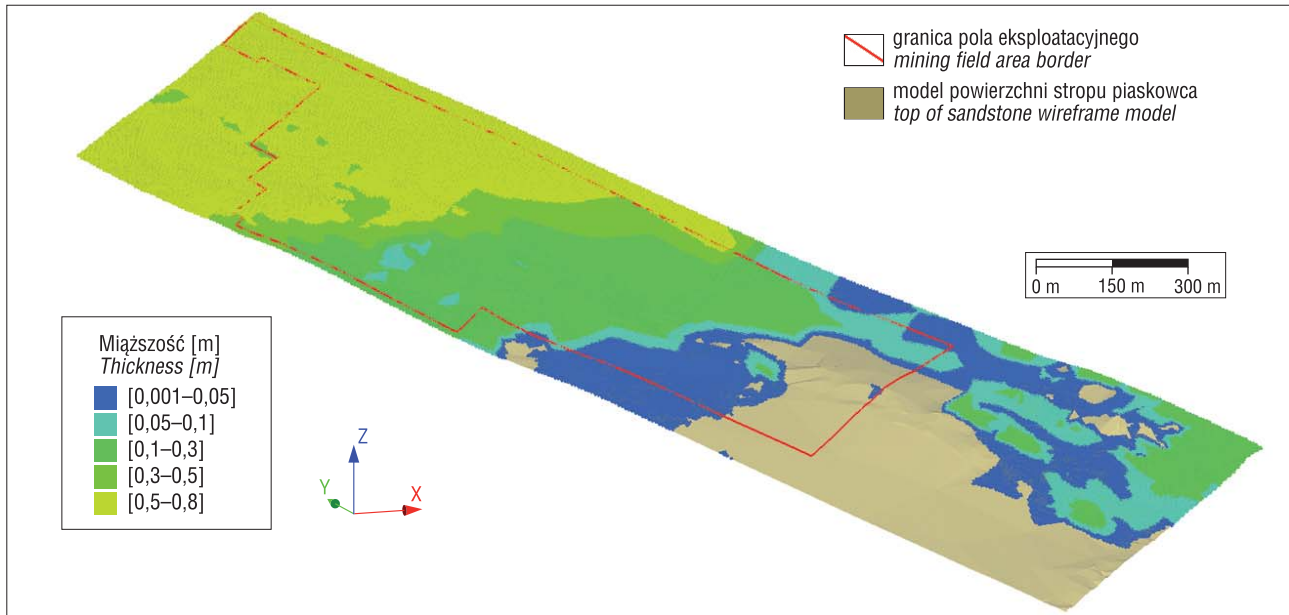
Model pionowych granic złoża bilansowego jest reprezentowany przez trójwymiarowe powierzchnie wyznaczające zasięg (strop i spąg) mineralizacji miedziowej w modelowanej przestrzeni. Powierzchnie te są generowane w formie modelu szkieletowego według ustalonych kryteriów brzeżnych, które na potrzeby budowy modelu można zróżnicować w zależności od wydzielenia litologicznego. Granice występowania mineralizacji bilansowej są wyznaczone na podstawie wyników oznaczeń zawartości Cu i Ag w próbkach geologicznych pobranych w modelowanym obszarze (ryc. 7). Różnicowanie kryteriów pozwala na przeprowadzanie analiz zmian w zasobach, raportowanie zmian ilościowych w podziale na typy litologiczne wraz ze wskazaniem miejsc, w których następuje przyrost lub ubytek zasobów na skutek zastosowania innego kryterium brzeżnego. Przestrzennej identyfikacji wykazanych różnic sprzyja możliwość wizualizacji 3D oraz mechanizm automatycznego generowania przekrojów przez model. Modele przebiegu granic złoża bilansowego, podobnie jak modele litologiczne, wykorzystuje się w procesie projektowania wyrobisk eksploatacyjnych celem wyznaczenia optymalnej furty eksploatacyjnej. Projekt techniczny eksploatacji złoża uwzględnia informacje o miąższości złoża

bilansowego i miąższości przybieranej skały płonnej (w celu zapewnienia stabilności i bezpieczeństwa prowadzenia stropu wyrobiska). Dodatkowym walorem standaryzacji w tym zakresie jest dokładniejsza prognoza zubożenia kopaliny.

MODEL JAKOŚCIOWY ZŁOŻA RUD MIEDZI

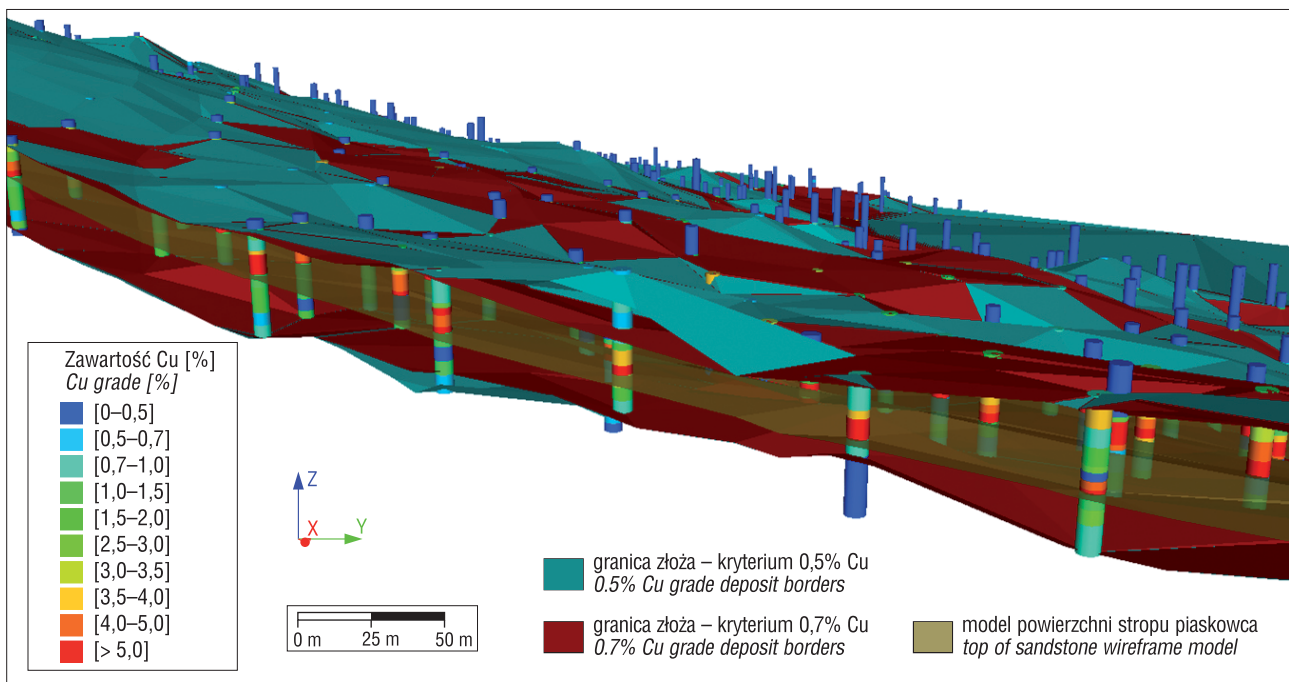
Granice 7 złóż rud miedzi na monoklinie przedsudectkiej użytkowanych przez KGHM Polska Miedź S.A. wyni-

kają z ustalonych administracyjnie kryteriów brzeżnych (Ustawa..., 2011; Rozporządzenie Ministra Środowiska, 2015). Obecność mineralizacji Cu-Ag w tych złożach jest obserwowana w bardzo szerokim interwale utworów cechsztynu, sięgającym miąższości kilkudziesięciu metrów (Nieć, Piestrzyński, 2007), jednak zastosowanie przyjętych kryteriów zawęży profil złoża bilansowego do warstw cechsztyńskiego łupka miedzionośnego i jego bezpośredniego otoczenia. W typowym profilu złożowym bilansowe okruszcowanie lokuje się w trzech głównych seriach



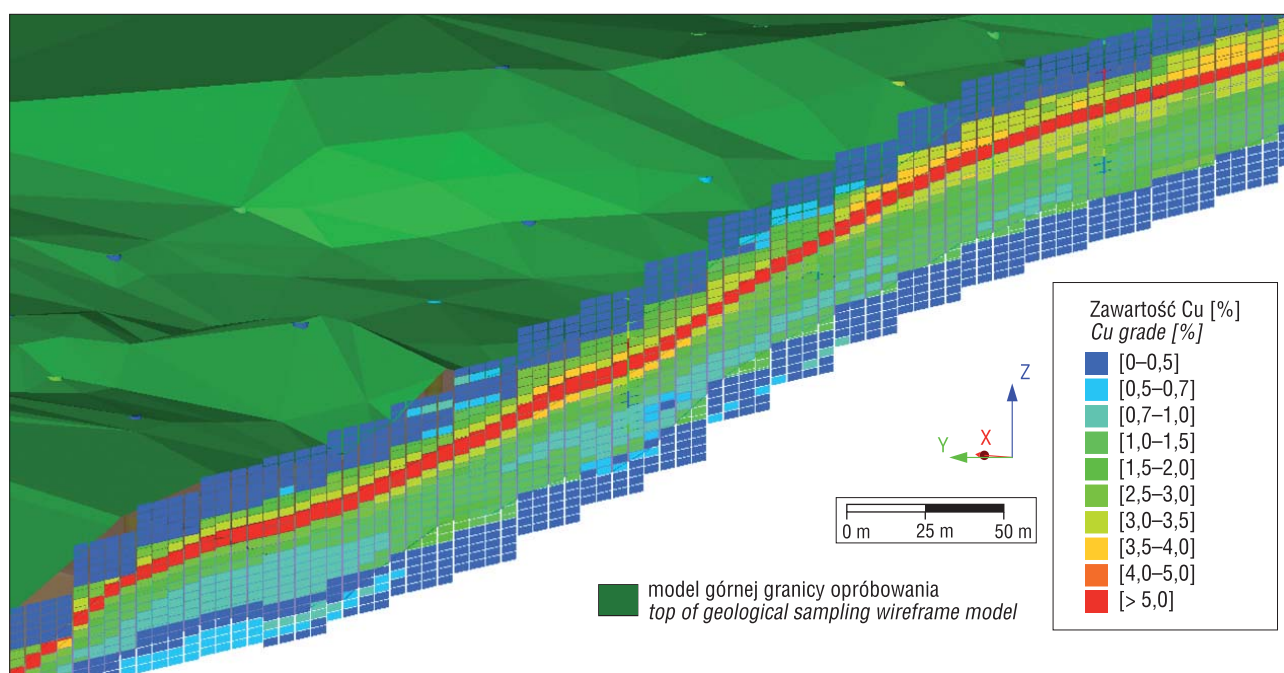
Ryc. 6. Przykładowy model strukturalny – występowanie i miąższość łupka miedzionośnego w polu eksploatacyjnym na tle powierzchni stropu białego piaskowca. Widoczny zanik rudy łupkowej w prawej części obszaru (strefa elewacji stropu białego piaskowca)

Fig. 6. Structural model example – occurrence and thickness of the copper shale (Kupferschiefer) within the exploitation field area and its surroundings. Gradual thickness reduction in the right part of Figure (towards the top surface of Weissliegend elevation)



Ryc. 7. Model strukturalny – granice złoża bilansowego. Widoczne lokalne przyrosty zasobów dla kryterium Cu > 0,5%. Profile opróbowania geologicznego przedstawiono w formie pionowych walców

Fig. 7. Structural model – borders of balance mineralisation. Visible local increases for the 0.5% Cu cut-off grade. Geological samples are presented as vertical cylinders



Ryc. 8. Przekrój przez jakościowy model złoża rud miedzi. Zróżnicowanie kolorów komórek modelu wskazuje zróżnicowanie zawartości Cu (barwa czerwona – najwyższa zawartość, barwa niebieska – zawartość poniżej 0,5% Cu)

Fig. 8. Cross-section through the copper ore grade block model. Differences between cell colours indicate variability of Cu grades (red – the highest grades, blue – grades below 0.5% Cu)

litologicznych o łącznej miąższości nie przekraczającej obecnie kilku metrów. Należy również zwrócić uwagę na nierównomierność intensywności okruszczenia w granicach złoża bilansowego oraz w skałe otaczającej (charakteryzującej się zawartością Cu i Ag poniżej kryteriów brzeźnych), która również podlega eksploatacji górniczej. Informacja o zawartości Cu w opróbowanych profilach geologicznych stanowi zestaw danych źródłowych do sporządzenia zarówno modelu granic złoża, jak i modelu jakościowego złoża.

Model jakościowy złoża dostarcza informacji o zawartości pierwiastków w granicach występowania mineralizacji bilansowej oraz w skałach otaczających. Model ten jest budowany z wykorzystaniem modelu strukturalnego (modelu głównych wydzielen litologicznych i modelu granic złoża bilansowego) oraz danych pochodzących z opróbowania wyrobisk wraz z wynikami oznaczeń laboratoryjnych zawartości składników użytecznych. Wykorzystanie trójwymiarowych granic wydzielen litologicznych oraz granic mineralizacji umożliwia utworzenie modelu blokowego, składającego się z komórek o wymiarach poziomych dobranych przez geologa (prawidłowo dobrany wymiar poziomy komórki powinien uwzględniać rozkład przestrzenny sieci opróbowania). Pionowy wymiar komórek w modelu uwzględnia miąższość wydzielen litologicznych oraz przebieg granic mineralizacji bilansowej w ich obrębie (elementy modelu strukturalnego). Efektem przeprowadzanej procedury jest model blokowy, w którym każda z komórek ma jednoznacznie zidentyfikowaną lokalizację (w granicach złoża lub poza granicami złoża), ponadto każda z komórek jest przypisana do odpowiedniej serii litologicznej (węglany, łupki lub piaskowce). Komórki w wymiarze pionowym mogą być dzielone na mniejsze celem lepszego odwzorowania pionowej zmienności parametrów złoża. Ta niewątpliwa zaleta, umożliwiająca

poprawienie dokładności odwzorowania szacowanych parametrów, skutkuje jednak znacznym przyrostem liczby komórek, co przekłada się na wzrost czasochłonności generowania finalnego modelu.

Kolejnym krokiem budowy modelu jakościowego jest przypisanie wszystkim komórkom modelu parametrów, których źródłem są wyniki oznaczeń laboratoryjnych opróbowania geologicznego. Z zastosowaniem metod geostatystyki 3D przeprowadza się estymację zawartości poszczególnych składników w komórkach modelu jakościowego. Mając na uwadze obserwowaną zmienność parametrów w modelowanym obszarze oraz gęstość sieci wykonanego opróbowania dobiera się metodę interpolacji oraz definiuje zakres wyszukiwania i zliczania danych. W procesie estymacji w każdej komórce modelu jest obliczana zawartość składników (np. Cu, Ag, Pb) z uwzględnieniem zdefiniowanych kryteriów (ryc. 8). Ze względu na skrajnie nierównomierne rozmieszczenie metali w serii złożowej (np. znacznie bogatsza mineralizacja Cu i Ag w serii łupków miedzionośnych w stosunku do występujących w ich otoczeniu rud węglanowych i piaskowcowych), estymacje są przeprowadzane oddzielnie dla każdego z głównych wydzielen litologicznych. Zapobiega to rozmyciu szacowanych parametrów przy granicach poszczególnych wydzielen (Mucha, Wasilewska-Błaszczak, 2010).

W praktyce kopalnianej model jakościowy jest wykorzystywany w procesach planowania i projektowania produkcji górniczej i stanowi źródło informacji o zawartości składników użytecznych w złożu, wspierające wizualną weryfikację założeń projektu przyszłego zagospodarowania złoża. Model blokowy może pełnić rolę rozbudowanej bazy danych o parametrach geologicznych złoża ilustrujących wartości parametrów złożowych oraz ich zmienność. Struktura zapisu danych w opracowanym modelu daje niemal nieograniczone możliwości przypisywania

atrybutów komórkom modelu, umożliwiając tym samym wykonywanie złożonych analiz statystycznych i ocen wizualnych.

PODSUMOWANIE

Trójwymiarowe modele geologiczne, wykorzystywane zazwyczaj do zwiększenia efektywności funkcjonowania przedsiębiorstwa górniczego, są dziś jednym z kluczowych elementów działalności nowoczesnych firm sektora wydobywczego. Dokładność odwzorowania rzeczywistości w trzech wymiarach przestrzennych wpływa na trafność podejmowanych decyzji, wspomaga intensyfikację produkcji oraz poprawia bezpieczeństwo pracy, umożliwiając prognozowanie stref potencjalnych zagrożeń naturalnych. Rzetelnie wykonany model złoża, wykorzystujący potencjał oferowany przez dedykowane oprogramowanie, umożliwia precyzyjne odwzorowanie budowy złoża w formie cyfrowej, co znakomicie zwiększa możliwości interpretacji danych.

Pomimo wielu niekwestionowanych zalet modeli trójwymiarowych ich stosowanie nie zawsze jest konieczne. Niekiedy pracochłonność procesu modelowania bywa niewspółmierna do uzyskanych efektów. W osiągnięciu celu znacznie pomaga wypracowanie jednolitej metodyki modelowania oraz zarządzania danymi i przechowywania ich. Przygotowanie kadry oraz opracowanie zbioru tak zwanych dobrych praktyk, bazujących na własnych doświadczeniach, pozwala na wykorzystanie nowych technik obrazowania w sposób szybszy, bardziej precyzyjny oraz efektywny. Ważne jest jednak, aby każdorazowo przed przystąpieniem do realizacji zagadnień związanych z modelowaniem geologicznym szukano optymalnych i sprawdzonych rozwiązań, które będą adekwatne do definiowanych potrzeb. Nie ulega wątpliwości, że technologia trójwymiarowego modelowania to obecnie jedna z najdokładniejszych form odwzorowania sytuacji geologicznej, a stały rozwój technologii informatycznych oraz zaawansowanych metod komputerowego przetwarzania danych pozwala na coraz szersze jej zastosowanie.

LITERATURA

- HARAŃCZYK C. 1966 – Cechsztyńskie ołowionośne łupki ilaste. *Rudy i Met. Nieżel.*, 12: 613–621.
- KACZMAREK W., ROŻEK R., MRZYGLÓD M., JASIŃSKI W. 2014 – Litologia szczegółowa w Bazie Danych Geologicznych KGHM *Polska Miedź* S.A., Gór. Odkr., 55 (2–3): 86–91.
- KACZMAREK W., TWARDOWSKI M., WASILEWSKA-BŁASZCZYK M. 2017 – Praktyczne aspekty modelowania litologicznych typów rud w złożach Cu-Ag LGOM. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 468: 209–226.
- KŁAPCZIŃSKI J. 1964a – Paleogeografia cechsztynu monokliny przedsudeckiej. *Rocznik PTG*, 34: 551–557.
- KŁAPCZIŃSKI J. 1964b – Stratygrafia cechsztynu okolic Lubina, Sieroszowic i Wschowy (monoklina przedsudecka). *Rocznik PTG*, 34: 65–93.
- KOKESZ Z. 2006 – Trudności i ograniczenia w geostatystycznym modelowaniu zmienności złóż i szacowaniu zasobów metodą krigingu. *Gosp. Sur. Min.*, 22 (3): 5–20.
- KONSTANTYNOWICZ E. 1964a – Margle plamiste a mineralizacja osadów cechsztyńskich. *Rudy i Met. Nieżel.*, 9: 170–175.
- KONSTANTYNOWICZ E. 1964b – Wiarygodność danych geologicznych dla górnictwa rud miedzi. *Rudy i Met. Nieżel.*, 10: 563–570.
- KRASOŃ J. 1964 – Podział stratygraficzny cechsztynu północnosudeckiego w świetle badań facjalnych. *Geol. Sudet.*, 1: 221–255.
- LESZCZYŃSKI R. 2011 – Model złoża – porównanie modeli z pierwszych dokumentacji geologicznych z modelami obecnymi. [W:] *Geologia w służbie Polskiej Miedzi. Materiały Konferencji Środowiskowej Geologów TKP, KGHM Polska Miedź S.A.*, Lubin: 21–34.
- MUCHA J. 1994 – Metody geostatystyczne w dokumentowaniu złóż. *Wyd. AGH, Kraków.*
- MUCHA J. 2001 – Bariery i ograniczenia geostatystycznej oceny parametrów złożowych. *Zesz. Nauk. AGH, Geologia*, 27 (2/4): 641–658.
- MUCHA J., WASILEWSKA-BŁASZCZYK M. 2009 – Trójwymiarowe modelowanie wartości parametrów złożowych metodą krigingu zyczącego 3D. *Kwart. AGH, Geologia*, 35 (2/1): 167–174.
- MUCHA J., WASILEWSKA-BŁASZCZYK M. 2010 – Prognozowanie jakości urobku metodami geostatystyki 3D – perspektywy i ograniczenia. *Gosp. Sur. Min.*, 26 (2): 57–67.
- MUCHA J., WASILEWSKA-BŁASZCZYK M., WAWRZUTA P. 2010 – Uwarunkowania geostatystycznego modelowania złóż Cu-Ag LGOM dla projektowania eksploatacji uśredniającej. *Zesz. Nauk. IGSMiE PAN*, 79: 121–130.
- NAWORYTA W. 2017 – Meandry modelowania złóż – na podstawie doświadczeń i obserwacji. *Górn. Odkr.*, 4: 4–9.
- NIEĆ M. 1964 – Analiza statystyczna złóż miedzi monokliny przedsudeckiej. *Rudy i Met. Nieżel.*, 6: 300–305.
- NIEĆ M. (red.) 2012 – *Metodyka dokumentowania złóż kopalni stałych*, cz. 1–4. *Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.*
- NIEĆ M., PIESTRZYŃSKI A. 2007 – Forma i budowa złoża. [W:] *Piestrzyński A. (red.), Monografia KGHM Polska Miedź S.A.*, Lubin: 157–163.
- NIEĆ M., WACHELKA L., SIATA E., KŁOS M., WIŚNIEWSKI J., SOŁOWCZUK M. 1999 – Cyfrowe modele złoża i ich wykorzystanie w dokumentowaniu złóż i obsłudze geologicznej kopalń. [W:] *Optymalizacja wydobywania kopalni przy wykorzystaniu technik informatycznych. AWiR Silesia, Katowice*: 39–45.
- NIEDBAŁ M., PATEREK M., PYRA J. 2019 – Modelowanie i szacowanie wartości zasobów złóż stratoidalnych z wykorzystaniem programu QGIS. *Cuprum*, 3 (92): 5–17.
- OBERC J. 1962 – Monoklina wrocławska i jej stosunek do jednostek sąsiednich. *Prz. Geol.*, 11: 573–575.
- PACTWA K. 2009 – Wybrane programy komputerowe wykorzystywane w górnictwie – przegląd zastosowań. *Pr. Nauk. Inst. Gór. Polit. Wroc.* 128, *Stud. Mater.*, 36: 169–179.
- ROZPORZĄDZENIE Ministra Środowiska z dnia 1 lipca 2015 r. w sprawie dokumentacji geologicznej złoża kopaliny, z wyłączeniem złoża węglowodorów. *Dz. U.* z 2015 r. poz. 987.
- RYDZEWSKI A. 1964 – Petrografia i mineralizacja osadów górnego permu na monoklinie przedsudeckiej i peryklinie Żar. *Prz. Geol.*, 12: 476–479.
- SALSKI W. 1968 – Charakterystyka litologiczna i drobne struktury łupków miedzionośnych monokliny przedsudeckiej. *Kwart. Geol.* 12 (4): 855–873.
- SERMET E., GÓRECKI J., NIEĆ M. 2017 – Tradycja, nowoczesność i pułapki modelowania złóż. *Zesz. Nauk. IGSMiE PAN*, 100: 221–234.
- TOMASZEWSKI J.B. 1962 – Problemy stratygrafii monokliny przedsudeckiej. *Rudy i Met. Nieżel.*, 7: 547–551.
- USTAWA z dnia 9 czerwca 2011 r. – *Prawo geologiczne i górnicze*. *Dz. U.* z 2019 r. poz. 868, z późn. zm.
- WASILEWSKA-BŁASZCZYK M., TWARDOWSKI M., MUCHA J., KACZMAREK W. 2017 – Model litologiczny 3D przy zastosowaniu technik interpolacyjnych i symulacji geostatystycznej (na przykładzie złoża Cu-Ag LGOM). *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 468: 237–246.
- WYŻYKOWSKI J. 1958 – Poszukiwania rud miedzi na obszarze strefy przedsudeckiej. *Prz. Geol.*, 5 (1): 17–22.
- WYŻYKOWSKI J. 1959 – Dokumentacja geologiczna złoża rud miedzi Sieroszowice-Lubin w rejonie Głogowa i Legnicy. *CAG Inst. Geol., Warszawa*: 143–148.

Praca wpłynęła do redakcji 3.08.2020 r.
Akceptowano do druku 9.11.2020 r.