PROBLEM OCENY GĘSTOŚCI PRZESTRZENNEJ (OBJĘTOŚCIOWEJ) KOPALINY W DOKUMENTOWANIU ZŁÓŻ

DETERMINING THE VOLUMETRIC DENSITY OF A RAW MATERIAL DURING DEPOSIT DOCUMENTATION

Jacek Mucha, Monika Wasilewska-Błaszczyk - AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

Poprawna ocena gęstości przestrzennej (objętościowej, pozornej) kopaliny jest jednym z czynników decydujących o dokładności oszacowań jej zasobów, które należą do ważnych aktywów firm górniczych. Błędne oszacowanie zasobów nierzadko prowadzi do niepowodzenia projektów górniczych i trudności w rozliczaniu wydobycia kopaliny. Gęstość przestrzenna niesłusznie uważana jest za parametr zasobowy o drugorzędnym znaczeniu i zapewne z tego powodu tylko okazjonalnie bywa przedmiotem szerszych badań i publikacji naukowych. Pogląd taki jest pokłosiem małej zmienności gęstości przestrzennej na tle zmienności innych parametrów zasobowych (miąższości złoża, zawartości składników użytecznych) co w artykule zilustrowano przykładami z polskich złóż węgla kamiennego i rud Cu-Ag LGOM. Łatwo w tej sytuacji wykazać metodami statystycznymi nikły i w praktyce pomijalny wpływ dokładności oceny tego parametru na wielkość błędu oszacowania zasobów. Rozumowanie takie jest jednak poprawne jedynie wtedy gdy przypisywane kopalinie wartości gęstości przestrzennej są wolne od błędów systematycznych, które mogą być efektem niewłaściwej metody oznaczania tego parametru lub wewnętrznej niejednorodności geologicznej kopaliny. Tę drugą przyczynę przeanalizowano na przykładzie jednego ze złóż Cu-Ag LGOM, w którym wykonano szeroko zakrojone opróbowanie eksperymentalne szczegółowych wydzieleń litologicznych, składających się na wydzielenia podstawowe. Oznaczone w nich gęstości przestrzenne odbiegają, niekiedy sporo, od wartości referencyjnych przypisywanych w dokumentacjach wydzieleniom podstawowym. Niejednorodność litologiczna wydzieleń podstawowych, przejawiająca się zanikiem występowania niektórych wydzieleń szczegółowych lub zmianą ich udziałów miąższościowych w granicach złoża bilansowego, może więc znacząco wpływać na faktyczną gęstość przestrzenną wydzieleń podstawowych. Różnice względne ocen gęstości przestrzennej dokonanych na podstawie opróbowania eksperymentalnego i wartości referencyjnych mogą lokalnie sięgać kilkunastu procent. Skutkują one systematycznym błędem oszacowań zasobów kopaliny, szczególnie w małych partiach złoża i w konsekwencji trudnościami w prawidłowym rozliczeniu wydobycia kopaliny w krótkich okresach czasu.

Słowa kluczowe: *gęstość objętościowa, węgiel kamienny, rudy Cu-Ag LGOM, statystyka*

The correct estimation of the spatial density (volumetric, apparent) of the mineral is one of the factors determining the accuracy of estimation of resources, which are important assets of mining companies. Incorrect estimation of resources often leads to the failure of mining projects and difficulties in evaluation of mining production. The volumetric density is wrongly considered a resource parameter of secondary importance and, probably for this reason, is rarely the subject of scientific interest (both research and publications). This is due to a small variability of volumetric density compared to the variability of other resource parameters (deposit thickness, the content of useful components) as illustrated on the examples of Polish bituminous coal deposits and Cu-Ag ore deposits of the Lubin-Głogów Copper District (LGCD). In this situation it is easy to show the weak and practically negligible influence of the accuracy of the assessment of this parameter on the error of resource estimation using statistical methods. However, such a reasoning is correct only when the volumetric density values assigned to the minerals are free of systematic errors, which may be the result of an incorrect method of determining this parameter or the internal geological heterogeneity of the mineral. This second reason was analyzed on the example of one of the Cu-Ag ore LGCD deposits, where extensive experimental sampling of individual lithological units, making up the main lithological units, was carried out. The determined volumetric densities diverge, sometimes significantly, from the reference values in the documentation of the main lithological units. The lithological heterogeneity of the main lithological units manifested by the lack of individual lithological units or the change of their thickness within the boundaries of the balance sheet deposit can thus significantly affect the actual volumetric density of the main lithological units. Relative differences in the volumetric density estimates based on experimental sampling and reference values may locally reach up to several percent. They result in a systematic error in the estimation of mineral resources, especially in small parts of the deposit and, consequently, in difficulties in the proper evaluation of mineral extraction in short periods of time.

Keywords: *volumetric density, coal seams, Cu-Ag ore deposit LGCD, statistics*

Wprowadzenie

Znajomość gęstości przestrzennej kopaliny zwanej także objętościową [13] jest wraz z pomiarami pozostałych parametrów zasobowych niezbędna dla oszacowania zasobów kopaliny oraz składników użytecznych lub szkodliwych. Błędne oszacowanie zasobów wynikające z błędów oszacowań parametrów zasobowych nierzadko prowadzi do niepowodzenia projektów górniczych i trudności w rozliczaniu wydobycia kopaliny. W tym kontekście gęstość przestrzenna niesłusznie uważana jest za parametr zasobowy o drugorzędnym znaczeniu z uwagi na generalnie jego małą zmienność skutkującą zaniedbywalnie małym wpływem na dokładność oszacowania zasobów, co zilustrowano w następnym rozdziale na przykładzie pokładów węgla kamiennego. Ta cecha rozpatrywanego parametru zasobowego sprawia zapewne, że bywa on tylko sporadycznie przedmiotem szerszych badań i publikacji naukowych. Rozumowanie statystyczne, dowodzące nikłego wpływu dokładności oszacowań gęstości przestrzennej kopaliny na dokładność oszacowania jej zasobów, jest jednak poprawne jedynie wtedy gdy przypisywane kopalinie wartości gęstości przestrzennej są wolne od błędów systematycznych, które mogą być efektem niewłaściwej metody oznaczania tego parametru lub wewnętrznej niejednorodności złoża. Wpływ drugiego z wymienionych czynników, obszarowego zróżnicowania składu litologicznego kopaliny, zilustrowano na przykładzie jednego ze złóż Cu-Ag LGOM. Może on mieć istotne znaczenie przy szacowaniu zasobów złoża w skali lokalnej (niewielkich partiach złoża odpowiadających tzw. pozycjom odbiorowym) i w konsekwencji prowadzić do trudności we właściwym rozliczeniu wydobycia kopaliny.

Zmienność gęstości przestrzennej kopaliny i jej wpływ na dokładność szacowania zasobów

Wieloletnie doświadczenia badania złóż wskazują, że gęstość przestrzenna kopaliny cechuje się znacznie mniejszą

Tab. 1. Statystyka gęstości przestrzennej węgla w 33. badanych pokładach ze złóż GZW i LZW
Tab. 1. Statistics of volumetric density of coal for 33 seams of Polish deposits

Złoża	Liczba pokładów	Średnie gęstości przestrzenne [Mg/ m^3]	Współczynnik zmienności [%]	Wsp. korelacji liniowej gęstości przestrzennej z zawartością popiołu
GZW - 5 złóż niezagospodarowanych*	24	1,32 – 1,48	3 – 11	0,30 - 0,83
GZW – 3 złoża zagospodarowane**	6	1,34 – 1,41	3 - 10	0,49 - 0,91
LZW***	3	1,34 – 1,39	6 – 8	Nie badano

*Objaśnienia: *Wisła I-II, Oświęcim-Polanka, Za Rowem Bełckim, Międzyrzecze [8], Ćwiklice [3]; **Budryk [7], Silesia [6], Piast [2]; *** pokłady 380, 382, 391 [9]*

Tab. 2. Parametry statystyczne gęstości przestrzennej 8. szczegółowych wydzieleń litologicznych [4, 5, 10]
Tab. 2. Basic statistics for volumetric densities of 8 detailed lithological units [4,5,10]

Wydzielenia litologiczne szczegółowe *	Liczba danych	Średnia arytmetyczna [Mg/m^3]	Współczynnik zmienności [%]	Wartości referencyjne [Mg/m^3]	Różnica względna	Gęstość przestrzenna dla wydzieleń podstawowych**	Różnica względna (odniesiona do wartości referencyjnych)
Dolomit smugowany (27,0%)	195	2,70	2	2,6	3,8%	2,70	4,0%
Dolomit ilasty (5,4%)	38	2,66	2	2,6	2,3%		
Dolomit wapnisty (11,3%)	86	2,73	2	2,6	5,0%		
Łupek dolomityczny (32,2%)	202	2,59	4	2,5	3,6%	2,54	1,6%
Łupek smolisty (6,1%)	6	2,32	4	2,5	-7,2%		
Piaskowiec węglanowy (2,2%)	102	2,55	4	2,3	10,9%	2,39	4,1%
Piaskowiec ilasty (8,1%)	64	2,35	6	2,3	2,2%		
Piaskowiec siarczanowy (<0,1%)	15	2,66	5	2,3	15,7%		

*Objaśnienia: *w nawiasach podano orientacyjny udział wydzielenia szczegółowego w zasobach przemysłowych złoża Polkowice–Sieroszowice; ** określono jako średnią ważoną na masę rudy*

zmiennością niż zmienność innych parametrów zasobowych takich jak miąższość złoża lub zawartość składników użytecznych. Z reguły współczynniki zmienności tego parametru wynoszą kilka – kilkanaście procent i zadowalającą dokładność oceny jego średniej wartości zapewnić może 20–30 pomiarów [11]. Pogląd ten potwierdzają wyniki pomiarów tego parametru dokonane w 33. pokładach węgla kamiennego GZW i LZW (tab. 1) oraz w obrębie szczegółowych wydzieleń litologicznych w złożu Cu-Ag Polkowice-Sieroszowice (tab. 2). Przy średnich gęstościach przestrzennych węgla w pokładach z przedziału 1,32 – 1,48 Mg/m^3 współczynniki zmienności wynoszą zaledwie od 3 do 11% (tab. 1). Dla pojedynczych pomiarów parametru rozrzut jego skrajnych wartości jest duży i wynosi od 1,14 do 1,75 Mg/m^3 [8]. Jeszcze mniejszą zmiennością gęstości przestrzennej cechują się szczegółowe wydzielenia litologiczne w złożu rud Cu-Ag Polkowice-Sieroszowice ze współczynnikami zmienności od 2 do 6% (tab. 2).

Zapewne nikła zmienność gęstości przestrzennej przyczyniła się do mniejszego zainteresowania tym parametrem zasobowym a liczba jego pomiarów jest zwykle wielokrotnie mniejsza niż pozostałych parametrów zasobowych. Zakładając brak błędów systematycznych pomiarów wpływ błędów oceny gęstości przestrzennej na dokładność oszacowania zasobów jest praktycznie niezauważalny o czym świadczy poniższy, uproszczony przykład liczbowy odniesiony do pokładów węgla kamiennego. W przypadku zastosowania do szacowania zasobów węgla w pokładzie popularnej i prostej metody średniej arytmetycznej, ich wielkość oblicza się ze wzoru:

$$Q = \bar{M} \cdot \bar{\rho_b} \cdot F$$

g d z i e : $\bar{M}$, $\bar{\rho_b}$ – średnie arytmetyczne odpowiednio: pomiarów miąższości i gęstości przestrzennej dla wartości określonych w punktach opróbowań; F – powierzchnia pozioma dokumentowanej części pokładu (w odróżnieniu od miąższości i gęstości przestrzennej, traktowanych jako zmienne losowe, w praktyce przyjmowana na ogół jako wielkość stała i pozbawiona błędu obliczeniowego).

Przy założeniu niezależności parametrów i ich czysto losowej zmienności błąd względny, standardowy oszacowania zasobów węgla wyraża się prostym wzorem [14]:

$$\varepsilon_R(Q) = \sqrt{[\varepsilon_R(\bar{M})]^2 + [\varepsilon_R(\bar{\rho}_b)]^2} \qquad (1)$$

g d z i e : $\varepsilon_R(\bar{M})$, $\varepsilon_R(\bar{\rho}_b)$ - błędy względne oszacowań średnich odpowiednio: miąższości pokładu i gęstości przestrzennej kopaliny wyznaczane ze wzorów:

$$\varepsilon_R(\bar{M}) = \frac{v_M}{\sqrt{n_1}}, \quad \varepsilon_R(\bar{\rho_b}) = \frac{v_{\rho b}}{\sqrt{n_2}} \qquad (2)$$

g d z i e : v_M, v_{ρ_b} , – współczynniki zmienności odpowiednio: miąższości pokładu i gęstości przestrzennej węgla, n_1, n_2 – liczba pomiarów.

Przyjmując dla celów obliczeniowych fikcyjne ale realistyczne wielkości współczynników zmienności: 40% dla miąższości pokładów i 10% dla gęstości objętościowej oraz identyczną liczbę pomiarów obu parametrów w dokumentowanej części złoża równą $n_1=n_2=25$ uzyskujemy ocenę względnego, standardowego błędu oszacowania zasobów węgla:

$$\varepsilon_R(Q) = \sqrt{\left(\frac{40}{\sqrt{25}}\right)^2 + \left(\frac{10}{\sqrt{25}}\right)^2} = \sqrt{8^2 + 2^2} = 8.25\% \qquad (3)$$

Zakładając teoretycznie brak błędu oceny średniej gęstości przestrzennej, błąd oszacowania zasobów wyniesie 8% i będzie jedynie znikomo mniejszy od wyżej wyliczonej wartości 8,25%, uwzględniającej błąd wnoszony przez oznaczenia średniej gęstości przestrzennej. Jak wynika z podanego przykładu wpływ dokładności oceny średniej gęstości przestrzennej na dokładność oszacowania zasobów przy równolicznych pomiarach jest w praktyce niezauważalny.

Nieco inaczej może kształtować się wkład błędów ocen średnich obu parametrów zasobowych w przypadku silnego zróżnicowania liczby ich pomiarów. Przyjmując, że wykonano n_1= 100 pomiarów miąższości i tylko n_2=16 pomiarów gęstości przestrzennej, błąd względny standardowy przy identycznych wartościach współczynników zmienności oceny zasobów wynosi:

$$\varepsilon_R(Q) = \sqrt{\left(\frac{40}{\sqrt{100}}\right)^2 + \left(\frac{10}{\sqrt{16}}\right)^2} = \sqrt{4^2 + 2.5^2} = 4.7\% \qquad (4)$$

Pomimo większego wkładu błędu oceny średniej gęstości przestrzennej niż błędu oceny średniej miąższości fakt ten nie ma większego znaczenia, gdyż dokładność oszacowania zasobów jest wysoka, z uwagi na wielokrotnie większą liczbę pomiarów parametru znacznie silniej zmiennego jakim jest miąższość. Należy zwrócić uwagę, że przedstawiony sposób określenia błędów jest poprawny w przypadku złóż jednorodnych lub ich jednorodnych partii. Znaczenie indywidualnych pomiarów gęstości przestrzennej jako parametru zasobowego wzrasta w sytuacji złóż niejednorodnych, gdzie stosowanie uśrednionych wartości może skutkować lokalnie znaczącymi błędami systematycznymi oceny zasobów. Zagadnienie to opisano szerzej w dalszej części artykułu.

Opróbowanie złoża i metody oznaczeń gęstości przestrzennej

Wiarygodność oznaczeń gęstości przestrzennej uzależniona jest silnie od wielkości pobieranych do tego celu prób, co z kolei determinuje dobór możliwych do zastosowania metod pomiarowych. Z oczywistych względów najdokładniejsze oznaczenia uzyskać można metodami polowymi na etapie górniczego udostępnienia złoża. Wymagają one wykonania w wyrobisku dużej wdzierki o, w miarę możliwości, prawidłowych kształtach. Masa wydobytego urobku podzielona przez wyznaczoną geometrycznie objętość daje ocenę gęstości przestrzennej. Uważa się, że objętość wybranej przestrzeni złożowej powinna wynosić około 10 m^3 [11]. Metoda ta umożliwia uwzględnienie dużych szczelin i kawern występujących w złożu ale jej wiarygodność obniżają możliwości precyzyjnego wyznaczenia objętości. Jest ona pracochłonna i kosztowna co limituje liczbę możliwych do pobrania prób. Ponadto powinny być one pobierane w obrębie jednorodnych partii złoża. W warunkach złóż Cu-Ag jest to trudne do spełnienia z uwagi na zmienny skład litologiczny kopaliny w profilu pionowym złoża. Wyróżnione w granicach wydzieleń podstawowych (węglanów, łupków i piaskowców) szczegółowe wydzielenia litologiczne (18 odmian) często różnią się nie tylko cechami geologicznymi i geochemicznymi (składem mineralnym, zawartością składników użytecznych) ale

również geometalurgicznymi (flotowalnością, gęstością przestrzenną, wytrzymałością mechaniczną skał, zawartością węgla organicznego - ważną dla efektywności procesu hutniczego). Miąższości niektórych, teoretycznie jednorodnych wewnętrznie wydzieleń litologicznych szczegółowych, są bardzo małe rzędu kilku - kilkunastu centymetrów (np. łupek smolisty, łupek ilasty) co wyklucza zastosowanie metod polowych i pobieranie próbek o dużej objętości. W tej sytuacji możliwe jest jedynie pobieranie stosunkowo niewielkich próbek w formie okruchów o masie rzędu kilkuset gramów i oznaczenie ich gęstości przestrzennej metodami laboratoryjnymi. W przypadku gdy możliwe jest wycięcie z okruchu próbki o regularnych kształtach (sześcianu, walca) można stosować metodę bezpośrednią sprowadzającą się do podzielenia masy próbki przez jej objętość wyznaczoną geometrycznie na podstawie pomierzonych rozmiarów próbki. W przypadku okruchów o formach nieregularnych (i nie rozsypujących się w wodzie) można zastosować jeden z wielu wariantów metody hydrostatycznej (immersyjnej) opartej na prawie Archimedesa. Wadą tych metod jest nieuwzględnianie dużych szczelin i pustek krasowych, co prowadzić może do zawyżania rzeczywistych gęstości objętościowych kopaliny. W warunkach rozpoznania wiertniczego, gdy dysponuje się jedynie rdzeniami wiertniczymi lub w warunkach rozpoznania górniczego, gdy zachodzi konieczność szacowania zasobów wydzieleń o małej miąższości metody laboratoryjne są jednak jedynymi możliwymi do zastosowania. Są one mniej pracochłonne niż metody polowe, a zatem umożliwiają dokonanie w razie potrzeby licznych oznaczeń tego parametru pokrywających całe złoże.

Należy zwrócić uwagę, że próbki do oznaczeń gęstości przestrzennej kopaliny powinny być pobierane w granicach złoża bilansowego lub w granicach projektowanej furty eksploatacyjnej. W złożu Polkowice-Sieroszowice w serii piaskowcowej stwierdzono silne zróżnicowanie gęstości przestrzennej próbek pobranych w obrębie furty eksploatacyjnej (2,51 Mg/m^3) i poniżej furty eksploatacyjnej (2,20 Mg/m^3) [15]. Prognozowanie w takim przypadku zasobów rudy przewidzianej do wydobycia (masy urobku) w oparciu o stosowaną w dokumentacjach wartość referencyjną dla serii piaskowcowej (2,3 Mg/m^3) prowadzi do dużych rozbieżności między oszacowanymi zasobami i uzyskaną produkcją, a więc i do trudności w rozliczeniu i zbilansowaniu produkcji.

Wpływ zmienności litologicznej złoża na wielkość gęstości przestrzennej rud Cu-Ag

Podstawą badania zagadnienia zawartego w tytule rozdziału było wykonane specjalnie do tego celu opróbowanie eksperymentalne złoża Polkowice-Sieroszowice. W jego ramach z litologicznych wydzieleń szczegółowych pobrano 708 prób, w których oznaczono gęstości przestrzenne, zawartości Cu i w części próbek porowatość całkowitą [10]. Z wyróżnionych w złożach Cu-Ag LGOM 14 wydzieleń szczegółowych opisanych przez Kaczmarka i in. [4, 5] opróbowaniu poddano 7 najbardziej zasobnych w miedź wydzieleń szczegółowych i dodatkowo z reguły słabo okruszcowany piaskowiec siarczanowy (tab. 2). Zawartości Cu w próbkach oznaczono w Centrum Badania Jakości w Lubinie. Oznaczeń gęstości przestrzennej w pobranych próbkach (tab. 2) i porowatości całkowitej dokonano w akredytowanym Laboratorium Badania Własności Skał i Wyrobów Kamieniarskich Akademii Górniczo–Hutniczej w Krakowie hydrostatyczną metodą kosza drucianego [10]. Wartości liczbowe gęstości przestrzennej określano ze wzoru:

$$\rho_b = \frac{m_d}{m_s - m_h}\rho_{rh} \tag{5}$$

gdzie:
m_d – masa wysuszonej próbki do badania [g],
m_s – masa nasyconej próbki do badania [g],
m_h – masa próbki do badania zanurzonej w wodzie [g],
p_{rh} – gęstość wody w temperaturze badania [g/cm^3].

Średnie arytmetyczne gęstości przestrzennej zestawione w tabeli 2 są wyraźnie zróżnicowane: od 2,32 Mg/m^3 (łupek smolisty z minimalną wartością 2,20 Mg/m^3) do 2,73 Mg/m^3 (dolomit wapnisty z maksymalną wartością 2,85 Mg/m^3). Wykonany test Games-Howell'a wykazał na poziomie istotności 0,05 statystycznie istotne różnice poziomów średnich gęstości przestrzennych wydzieleń szczegółowych w obrębie wydzieleń podstawowych w których występują. Z wyjątkiem łupka smolistego stwierdzono statystycznie istotnie wyższe wartości oszacowanych na podstawie opróbowania eksperymentalnego średnich gęstości przestrzennych typów rud szczegółowych od wartości referencyjnych dla wydzieleń podstawowych. Są one wyższe od nich o 2,2% (piaskowiec ilasty) do 15,7% (piaskowiec siarczanowy). W odniesieniu do 4. najbardziej zasobnych w Cu typów litologicznych, zawierających blisko 80% zasobów (łupek dolomityczny, dolomit smugowany, dolomit wapnisty i piaskowiec ilasty), zawyżenie to wynosi od 3,8% (łupek dolomityczny) do 10,9% (piaskowiec węglanowy).

Nowe oszacowania gęstości przestrzennej wydzieleń szczegółowych przeliczone na gęstości przestrzenne wydzieleń podstawowych (z wagowaniem na masę rudy) skutkują wzrostem oszacowań zasobów przemysłowych rudy i Cu w złożu Polkowice-Sieroszowice o 4,0% w serii węglanowej, 1,6% w serii łupkowej i 4,1% w serii piaskowcowej. Większych różnic można się spodziewać w przypadku oszacowań zasobów w małych partiach złoża gdzie w przypadku zaników niektórych wydzieleń szczegółowych lub zmiany proporcji ich miąższości, gęstości przestrzenne wydzieleń podstawowych mogą się różnić znacząco od wartości referencyjnych. Wpływ obszarowego zróżnicowania składu litologicznego kopaliny na gęstość przestrzenną wydzieleń podstawowych i złoża bilansowego zilustrowano na przykładzie złoża Cu-Ag Sieroszowice.

Profile litologiczne na rysunku 1 ilustrują stwierdzane w OG Sieroszowice zróżnicowanie składu wydzieleń litologicznych szczegółowych, a także ich miąższości w granicach złoża bilansowego oraz w granicach opróbowania (złoża i skał występujących w jego stropie i spągu).

Poszczególnym wydzieleniom litologicznym szczegółowym w 6. wytypowanych profilach (rys. 1) przypisano gęstości objętościowe z najbliżej położonych prób opróbowania eksperymentalnego. Dla każdego wydzielenia litologicznego szczegółowego, ale również w obrębie serii podstawowych i w granicach złoża bilansowego obliczono względne różnice ε_w gęstości przestrzennej ustalonej eksperymentalnie i wartości referencyjnej ze wzoru:

$$\varepsilon_w = \frac{\rho_b(E) - \rho_b(R)}{\rho_b(R)} \cdot 100\% \tag{6}$$

gdzie:

$\rho_b(E)$ – gęstość przestrzenna wydzielenia szczegółowego na podstawie opróbowania eksperymentalnego,

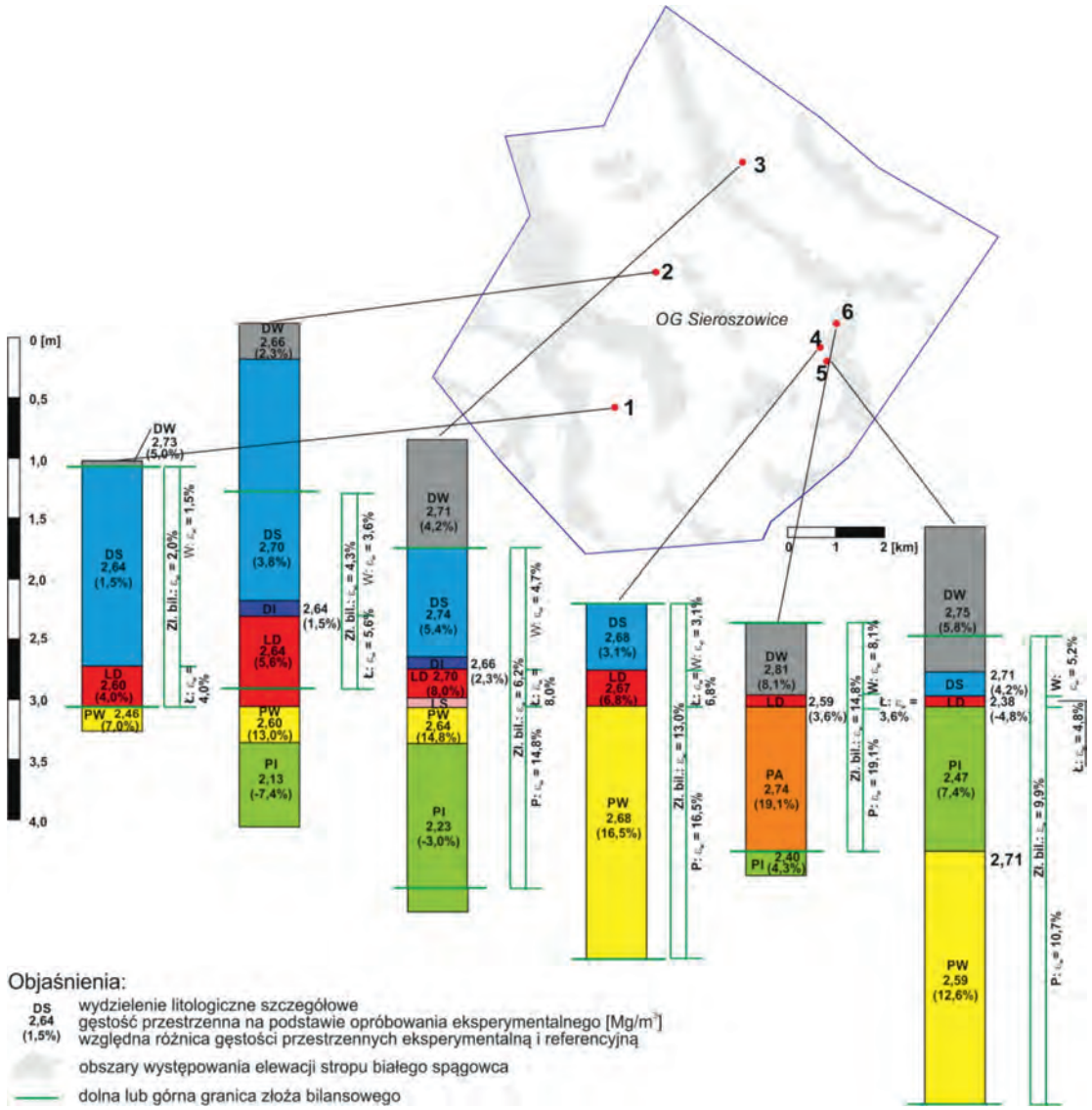
$\rho_b(E)$ – gęstość przestrzenna stosowana jako referencyjna dla serii podstawowej.

Wielkości względnych różnic w obrębie serii podstawowych i w granicach złoża bilansowego obliczono uwzględniając jako wagi miąższości wchodzących w ich skład wydzieleń litologicznych szczegółowych.

W części zachodniej i południowej złoża Sieroszowice, gdzie w granicach złoża bilansowego zazwyczaj występują serie węglanowa i łupkowa, wielkości względnych różnic są stosunkowo niskie i wynoszą od 2% do 4% (rys. 1, profil 1 i 2). Znacznie wyższe wartości względnych różnic gęstości stwierdza się w części wschodniej złoża, gdzie w granicach złoża bilansowego pojawia się seria piaskowcowa o miąższości nawet do 2 m z gęstościami przestrzennymi dla piaskowców węglanowych, ilastych i anhydrytowych od 2,40 do 2,74 Mg/m^3 (profile 4, 5, i 6).

Zmienność obszarowa pod względem gęstości przestrzennej w wydzieleniach litologicznych szczegółowych jest znaczna, co ilustrują przykładowo wartości gęstości przestrzennej w piaskowcach ilastych. Niższe od wartości referencyjnej, stosowanej dla serii piaskowcowej (2,3 Mg/m^3), są wartości gęstości przestrzennej piaskowców ilastych w profilach 2 i 3 (2,13 i 2,23 Mg/m^3) oraz znacznie od niej wyższe w profilach 6 i 5 (2,4 i 2,47 Mg/m^3) (rys. 1). Skutkuje to szerokim zakresem różnic względnych od -7,4% do 7,4%. Podobnie duże różnice w gęstościach przestrzennych łupku dolomitycznego w prezentowanych profilach litologicznych (od 2,38 do 2,70 Mg/m^3) przekładają się na duży zakres wielkości względnych różnic gęstości (od –4,8 do 8%).

Warto nadmienić, że próby z istotnie niższymi wartościami gęstości przestrzennej piaskowców ilastych pochodziły z obszarów depresji pomiędzy elewacjami stropu białego spągowca, natomiast wyższe gęstości przestrzenne stwierdzono w próbach z obszaru elewacji lub jej skłonu (rys. 1). Ta wstępna sugestia



Rys. 1. Przykładowe profile litologiczne w złożu Sieroszowice z informacją o gęstości przestrzennej wydzieleń litologicznych szczegółowych oraz względnymi różnicami gęstości eksperymentalnych i referencyjnych w wydzieleniach szczegółowych (DW – dolomit wapnisty, DS. – dolomit smugowany, DI – dolomit ilasty, LD – łupek dolomityczny, LS – łupek smolisty, PI – piaskowiec ilasty, PW – piaskowiec węglanowy, PA – piaskowiec anhydrytowy), podstawowych (W – seria węglanowa, Ł – seria łupkowa, P – seria piaskowcowa) oraz w granicach złoża bilansowego (Zł. bil.)

Fig. 1. Examples of lithological profiles in the Sieroszowice deposit with information on the volumetric density of individual lithological units and relative differences in experimental and reference densities in individual lithological units (DW – calcareous dolomite , DS – striped dolomite, DI – argillaceous dolomite, LD – dolomitic shale, LS – pitchy shale, PI – argillaceous sandstone, PW – carbonatic sandstone, PA – anhydritic sandstone), in main lithological ore types (W – carbonate series, Ł – shale series, P – sandstone series) and in economic deposit boundary (Zł. bil.)

uzależnienia wartości gęstości przestrzennej wydzielenia litologicznego od jego występowania w obrębie obszarów o zróżnicowanej morfologii stropu białego spągowca powinna zostać jednak zweryfikowana na specjalnie zaprojektowanym do tego celu opróbowaniu eksperymentalnym.

Regresyjne metody wyznaczania gęstości przestrzennej kopaliny

Nierzadko gęstość przestrzenna kopaliny jest skorelowana liniowo lub nieliniowo z zawartością niektórych jej składników chemicznych i porowatością. W pokładach węgla kamiennego jest ona dość często skorelowana z zawartością popiołu. Dla przebadanych 30. pokładów zagospodarowanych i niezagospodarowanych złóż GZW siła korelacji liniowej gęstości przestrzennej i zawartości popiołu jest bardzo zróżnicowana ze współczynnikami korelacji od 0,30 do 0,91 (tab. 1). Dla większości tych pokładów współczynniki korelacji są wysokie (>0,70) co stanowi racjonalną podstawę dla wyznaczania wartości gęstości przestrzennej z funkcji regresji liniowej wiążącej ten parametr z zawartością popiołu. Zapewne silniejsza korelacja występuje w tych pokładach, które charakteryzują się znaczną zmiennością udziału przerostów płonnych, których gęstości przestrzenne (od 2,0 do 2,8 Mg/ m^3) są wyraźnie wyższe od gęstości przestrzennej substancji węglowej (1,2 do 1,5 Mg/m^3).

Równie silnych zależności korelacyjnych między rozpatrywanymi zmiennymi można oczekiwać w złożach rud metali, w których gęstości właściwe minerałów kruszcowych są znacznie wyższe niż skał goszczących kruszce. Przykładowo, nieliniowe zależności stwierdzono między gęstością przestrzenną rudy ołowiu i zawartością ołowiu [11] jak również między gęstością przestrzenną kopaliny i zawartościami metali dla złóż żelaza i uranu oraz metali bazowych (Cu+Pb+Zn+Fe) [1].

Występowanie silnych i statystycznie istotnych korelacji z zawartościami metali powinno być wykorzystane do określania wartości gęstości przestrzennej w punktach opróbowań, w których nie dokonano oznaczenia tego parametru. Umożliwi to dokładniejsze oszacowanie tego parametru w lokalnej skali obserwacji zamiast przypisywania małym partiom złoża średniej arytmetycznej z pomiarów w całym złożu.

Wbrew oczekiwaniom wypływającym z przesłanek teoretycznych, siła prostej korelacji między gęstością objętościową i zawartością Cu, zarówno dla modeli liniowych, jak i nieliniowych jest generalnie zaskakująco słaba; jest ona co najwyżej umiarkowana a w zdecydowanej większości przypadków słaba lub bardzo słaba, a nierzadko takiej korelacji w ogóle brak. Pomijając nieistotny jako rezerwuar zasobów Cu piaskowiec siarczanowy, najsilniejszą korelację ze współczynnikiem korelacji wynoszącym zaledwie 0,5 stwierdzono dla łupka dolomitycznego. W tej sytuacji ustalanie wartości gęstości objętościowej rudy na podstawie modelu wiążącego ten parametr z zawartością Cu jest mało wiarygodne i z tego powodu nieuzasadnione. Oznacza to w praktyce geologiczno-górniczej, że skonstruowane modele zależności zmiennych (pomimo swej statystycznej istotności w większości przypadków) nie mogą służyć do predykcji (prognozy) wartości gęstości objętościowej na podstawie oznaczeń zawartości Cu. Przykład mocniejszej korelacji i funkcji regresji wiążącej gęstość przestrzenną próbek z zawartością Cu w dolomicie ilastym przedstawiono na rysunku 2.

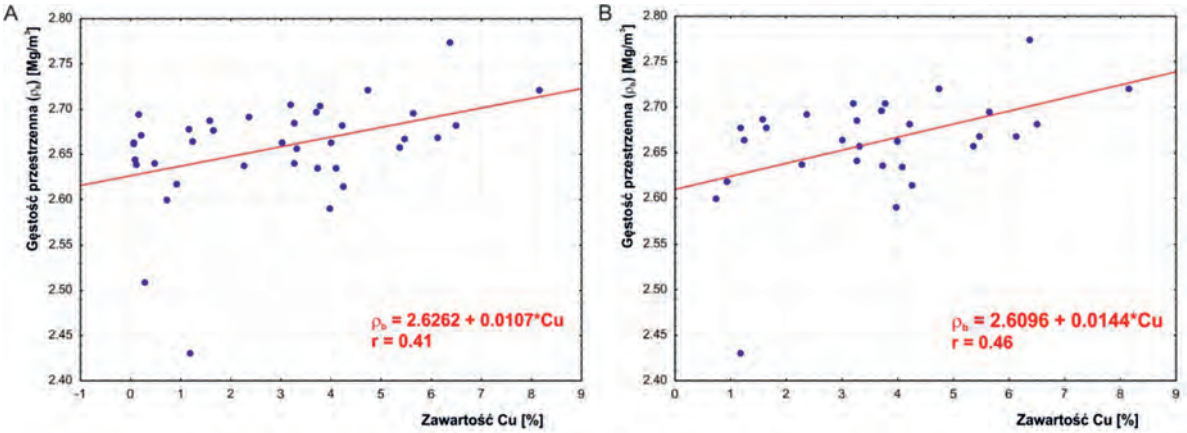
Wyjaśnienia braku satysfakcjonującej zależności należy upatrywać w oddziaływaniu innych czynników, które maskują bezpośrednią zależność gęstości objętościowej od zawartości Cu takich jak zmienność spoiwa rudy, zmienność porowatości lub występowanie ciężkich minerałów nie-miedziowych (np. ołowiu, żelaza).

Przypuszczenie to znalazło potwierdzenie w badaniach korelacji między gęstością przestrzenną i porowatością całkowitą kopaliny (tab. 3).Oba parametry są silnie skorelowane ze współczynnikami korelacji liniowej około 0,9. Rezultat ten, ważny z poznawczego punktu widzenia, nie ma jednak znaczenia dla usprawnienia metodyki oceny gęstości przestrzennej,

Tab. 3. Modele zależności liniowej między gęstością przestrzenną (ρ_b[Mg/ m^3]) i porowatością całkowitą (p[%]) (liczba próbek: 30, w każdej z próbek wydzielono 3 cząstki)
Tab. 3. Linear regression models between volumetric density (ρ_b [Mg/m^3]) and total porosity (p[%]) (numbers of samples: 30, 3 particles were isolated in each of the samples)

Nr cząstki	Model zależności liniowej	R^2	r
1	ρ_b = 2,707 - 0,028p	71,3%	0,84
2	ρ_b = 2,733 - 0,029p	85,9%	0,93
3	ρ_b = 2,721 - 0,030p	77,0%	0,88

Objaśnienia: r – współczynnik korelacji liniowej, R^2 – współczynnik determinacji



Rys. 2. Przykład korelacji i regresji liniowej pomiędzy gęstością przestrzenną (oś rzędnych) i zawartością miedzi (oś odciętych) w dolomicie ilastym (A – wszystkie dane, B – Cu>0,7%). Objaśnienia: r – współczynnik korelacji liniowej
Fig. 2. Examples of linear correlation and regression between volumetric density (ordinate) and Cu contents (abscissa) in argillaceous dolomite (A – all data, B – Cu>0,7%) Explanation: r – coefficient of linear correlation

gdyż w próbkach pobranych do oznaczeń metali nie oznacza się porowatości. Równie silną korelację odnotowano między gęstością przestrzenną rudy siarkowej i jej porowatością w złożu Grzybów ze współczynnikiem korelacji 0,93 [11].

Podsumowanie i wnioski

1. W wielu badanych pokładach węgla kamiennego GZW korelacja gęstości przestrzennej z zawartością popiołu jest silna (tzn. ze współczynnikiem korelacji liniowej >0,7), co oznacza w takich przypadkach, że wiarygodna prognoza gęstości przestrzennej w punktach spróbowań, w których nie dokonano jej oznaczenia może być dokonana na podstawie liniowego modelu zależności wiążącej ten parametr z zawartością popiołu uzależnioną od udziału przerostów płonnych w pokładzie. Taki sposób wyznaczania wartości tego parametru powinien przyczynić się do wzrostu dokładności lokalnych oszacowań zasobów węgla.

2. W złożu Cu-Ag Polkowice-Sieroszowice zależności korelacyjne między gęstością przestrzenną rudy są słabe (ze współczynnikiem korelacji nie przekraczającym 0,5 i w większości wydzieleń litologicznych szczegółowych znacznie mniejszym) co uniemożliwia wykorzystanie modelu regresyjnego dla wiarygodnej prognozy tego parametru w oparciu o znajomość zawartości Cu w punktach opróbowań. Można wstępnie przyjąć, że ta zależność, która powinna teoretycznie wystąpić może być w znacznej mierze maskowana przez wpływ innych cech litologicznych co znajduje potwierdzenie w silnej korelacji gęstości przestrzennej z porowatością materiału skalnego.

3. Określone na podstawie opróbowania eksperymentalnego średnie gęstości przestrzenne wydzieleń szczegółowych rudy Cu-Ag są z wyjątkiem łupku smolistego wyższe od wartości referencyjnych przyjmowanych dla wydzieleń podstawowych w obrębie których występują, co w konsekwencji oznacza, że rzeczywiste zasoby rudy i metalu mogą być nieznacznie większe (o około 3%) od wykazywanych w dokumentacjach.

4. Dokonane metodą hydrostatyczną oznaczenia gęstości przestrzennej wydzieleń szczegółowych złoża Cu-Ag z uwagi na małe masy pobranych prób (co często wynika z małych miąższości wydzieleń) wymagają weryfikacji innymi metodami. Określenie masy próbek w stanie wilgotnym lub suchym nie nastręcza żadnych trudności. Podstawowym problemem poprawnego wyznaczenia liczbowej wartości gęstości przestrzennej jest określenie objętości próbki. Można rozważyć i przetestować pobieranie materiału skalnego z wydrążonej w ociosie jamy i określenie jej objętości za pomocą drobnoziarnistego piasku pobieranego ze skalibrowanego pojemnika lub wypełniania jamy kulkami o znanej objętości. Warto również przebadać możliwości poboru próbek za pomocą krótkich otworów wierconych w ociosie wyrobiska.

5. Opróbowanie eksperymentalne wykazało istotne, obszarowe zróżnicowanie gęstości przestrzennej wydzieleń litologicznych szczegółowych w złożu Cu-Ag Sieroszowice, o czym świadczy szeroki zakres wartości gęstości przestrzennej np. w przypadku piaskowców ilastych (od 2,13 Mg/m^3 w części centralnej, przez 2,23 Mg/m^3 w części północnej do 2,47 Mg/m^3 w części wschodniej) i łupków dolomitycznych (od 2,38 w części wschodniej do 2,70 Mg/m^3 w części północnej). Uzasadnione jest postawienie hipotezy o istnieniu związku pomiędzy wartościami gęstości przestrzennej wydzielenia litologicznego szczegółowego i miejscem jej pomiaru względem depresji i elewacji stropu białego spągowca. Weryfikacja tej hipotezy wymaga jednak dodatkowych badań, a w szczególności wykonania odpowiednio zaprojektowanego opróbowania.

Praca wykonana w ramach subwencji AGH nr 16.16.140.315 w roku 2019.

Literatura

[1] Arseneau G. J., *Estimation of bulk density for mineral resource reporting*. CIM Journal, 2014, Vol. 5, No. 2

[2] Bębenek A., 2016, *Geostatystyczny model zmienności parametrów pokładu 209 ze złoża „Piast”*. Praca dypl., Arch. KGZiG AGH

[3] Donocik A., 2016, *Analiza porównawcza jakości wytypowanych pokładów węgla kamiennego z niezagospodarowanego złoża „Ćwiklice”*. Praca dypl., Arch. KGZiG AGH

[4] Kaczmarek W., Rożek R., Mrzygłód M., Jasiński W., *Litologia szczegółowa w bazie danych geologicznych KGHM Polska Miedź S.A.* Górnictwo Odkrywkowe, 2014, 2–3, 86–91. ISSN 0043-2075

[5] Kaczmarek W., Twardowski M., Wasilewska-Błaszczyk M., *Praktyczne aspekty modelowania litologicznych typów rud w złożach Cu-Ag LGOM (Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego)*. Biul. Państw. Inst. Geol., 2017, 468, 209-226. ISSN 0867-6143

[6] Lorenc M., 2015, *Struktura zmienności parametrów wytypowanych pokładów węgla w złożu „Silesia”*. Praca dypl., Arch. KGZiG AGH

[7] Mędziak K., 2018, *Analiza jakości węgla kamiennego na przykładzie wybranych pokładów w KWK Budryk.* Praca dypl., Arch. KGZiG AGH

[8] Mucha J., Wasilewska-Błaszczyk M., Paszek M., *Badanie zmienności i jednorodności gęstości przestrzennej węgla kamiennego w wytypowanych pokładach niezagospodarowanych złóż GZW*. Gór. Odkryw., 2015, R. LVI, nr 2, 79-85. ISSN 0043-2075

[9] Mucha J., Sermet E., Musiał A., *Homogeneity versus heterogeneity of selected parameters of coal seams – the Lublin Coal Basin case study, Poland. 16th International Multidisciplinary* Scientific Geoconference SGEM 2016, Conf. Proc., 2016, vol. 1, 241-248. ISBN 978-619-7105-55-1 / ISSN 1314-2704

[10] Mucha J., Wasilewska-Błaszczyk M., Auguścik J., Paszek M., *The volumetric density of ore – resource parameter of secondary importance?* (the Polkowice-Sieroszowice Cu-Ag deposit, Lubin-Głogów Mining District). Biul. Państw. Inst. Geol., 2017, 468, 227-236. ISSN 0043-2075

[11] Nieć M. (red.), Nieć M., Mucha J., Sobczyk E.J., Wasilewska-Błaszczyk M,. *Metodyka dokumentowania złóż kopalin stałych. Cz. 4,* Szacowanie zasobów. Kraków: Wyd. IGSMiE PAN, Ministerstwo Środowiska, Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej, 2012, 241s, ISBN 978-83-62922-13-0

[12] Paszek M., Wasilewska-Błaszczyk M., *The variability of volumetric density of the selected individual lithological units in the Cu-Ag deposit in the Lubin-Glogow copper district and its influence on the resources.* International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM: Surveying Geology & Mining Ecology Management, 2017, vol. 17, is. 1.1, 679-686. ISBN 978-619-7105-98-8 / ISSN 1314-2704

[13] PN-EN 1936:2010, *Metody badań kamienia naturalnego – Oznaczanie gęstości i gęstości objętościowej oraz całkowitej i otwartej porowatości.* PKN, Warszawa, 2010

[14] Sinclair A.J., Blackwell G.H.. 2002, *Applied Mineral Inventory Estimation.* Cambridge University Press, 381 s. ISBN 9780511545993

[15] Wrzosek A., 2015, *Wpływ oznaczeń gęstości przestrzennej na szacowanie zasobów kopaliny na przykładzie fragmentu złoża Polkowice-Sieroszowice.* Praca dypl., Arch. KGZiG AGH

Furta Dominikańska – Ucho Igielne w Sandomierzu

z arch. Urząd Miejski w Sandomierzu