

Warszawa, 15.12.2018 r.

Dr hab. Stanisław Z. Mikulski, *prof. nadzw.* PIG-PIB
Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy
Rakowiecka 4; 00-975 Warszawa
e-mail: stanislaw.mikulski@pgi.gov.pl

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Justyny Auguścik pt. „*Struktura zmienności oraz metodyka szacowania zasobów wytypowanych pierwiastków towarzyszących złożom Cu-Ag LGOM*”

Recenzja została wykonana zgodnie z decyzją Rady Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej z dnia 24.09.2018 r., o której zostałem powiadomiony pismem z dnia 04.10.2018 r., przez Dziekana Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH, prof. dr hab. inż. Jacka Matyszkiewicza.

Pani mgr inż. Justyna Auguścik wykonała rozprawę doktorską pod kierunkiem dr hab. inż. Jacka Muchy, prof. AGH w Katedrze Geologii Złożowej i Górniczej na Wydziale Geofizyki, Geologii i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Promotorem pomocniczym była dr inż. Monika Wasilewska-Błaszczak.

Rozprawa doktorska przedstawiona do recenzji dotyczy zbadania struktury zmienności oraz metodyki szacowania zasobów wybranych pierwiastków towarzyszących (arsenu, kobaltu, niklu, ołowiu i wanadu) w złożach Cu-Ag w Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym (LGOM) na monoklinie przedsudeckiej.

Rozprawa napisana jest w języku polskim, składa się z części tekstowej liczącej 150 stron oraz z części zawierającej załączniki rysunkowe i tabelaryczne. Rozprawa zawiera 16 rozdziałów i 22 podrozdziały oraz 6 spisów obejmujących zestawienie ustaw, stron internetowych, rysunków, tabel, a także załączników rysunkowych i tabelarycznych. W sumie w rozprawie przedstawionych zostało 64 rysunki, 26 tabel oraz 57 załączników rysunkowych i 18 tabelarycznych. Zestawienie cytowanej literatury liczy 169 pozycji materiałów publikowanych jak również opracowań archiwalnych.

Rozprawa doktorska poprzedzona jest krótkimi podziękowaniami oraz spisem treści. W rozdziale początkowym doktorantka opisuje cel i zakres przeprowadzonych badań. Do głównych celów zaliczyła zbadanie struktury zmienności oraz opracowanie metodyki szacowania zasobów pierwiastków towarzyszących w złożach Cu-Ag w LGOM na monoklinie przedsudeckiej. Podkreśla, że zastosowana nowa metodyka szacowania zasobności danego pierwiastka towarzyszącego w złożu miedzi uwzględnia również informacje o miąższości i gęstości przestrzennej głównych skał goszczących rudy. Zakłada, że zastosowana przez nią w rozprawie doktorskiej nowa metodyka powinna być bardziej wiarygodna niż aktualnie stosowane szacunki zasobności jednostkowej pierwiastków oparte tylko na podstawowych parametrach statystycznych zawartości pierwiastków w rudach.

Analizę struktury zmienności zasobności dla pięciu pierwiastków towarzyszących w rudach Cu postanowiła przeprowadzić w ujęciu probabilistycznym i geostatystycznym z wykorzystaniem semiwariogramów. Zaplanowane badania powinny umożliwić opisy struktur zmian zasobności jednostkowej pierwiastków, ich zmienności przestrzennej oraz weryfikację dotychczasowej metodyki opróbowania dla celów szacowania ich zasobów w kategorii co najmniej C₂. Już na początku pracy stwierdziła małą przydatność metod: korelacyjnej i mineralogicznej oraz wieloboków Bołdyriewa i bloków eksploatacyjnych dla szacowania zasobów pierwiastków towarzyszących. W zamian zaproponowała aplikację metod geostatystycznych z zakresu krigingu zwyczajnego, indykatowego oraz lognormalnego, a także prognozowanie przestrzenne za pomocą symulacji Turning Bands w celu wykazania większej dokładności w szacowaniu zasobów pierwiastków towarzyszących w złożach LGOM.

Do pierwiastków szkodliwych zaliczyła arsen i ołów, do strategicznych kobalt i wanad, a do towarzyszących odzyskiwanych w procesie przeróbki nikiel oraz ołów. W tym miejscu drobna uwaga, doktorantka powołując się na raporty Komisji Europejskiej („*Report on Critical Raw Materials...*” oraz „*Communication from the Commission to the European Parliament...*”) z 2014 i 2017 r. (str. 5 w. 10) przetłumaczyła Critical Raw Materials jako pierwiastki krytyczne, a powinno być surowce krytyczne ponieważ zaliczono również kopaliny takie jak: baryt, węgiel koksujący, fluoryt, kauczuk naturalny i fosforyty.

W rozdziale 3 doktorantka przedstawiła położenie administracyjne, geograficzne oraz zarys budowy geologicznej obszaru górniczego złoża Cu-Ag Rudna. Zarys budowy geologicznej obejmuje również opisy litostratygrafii, tektoniki, hydrogeologii oraz formy i budowy złoża Rudna. Dla badań geostatystycznych w ramach rozprawy doktorskiej przedstawiony krótki zarys budowy geologicznej oraz typów mineralizacji rudnych jest wystarczający, jednak pojawiają się pewne uproszczone, czy dyskusyjne sformułowania jak np. w tabeli 3.1. w opisie mineralizacji siarczkowej w łupku miedzionośnym stwierdza, że „*siarczki występują w postaci rozproszonego pyłu kruszcowego*”. W rozdziale 3 (str. 11; tab. 3.1) brak jest cytowań prac źródłowych z zakresu litostratygrafii, które w przypadku publikacji rozprawy koniecznie powinny być uzupełnione.

W kolejnym rozdziale zaprezentowane zostały dotychczasowe wyniki badań nad występowaniem arsenu, kobaltu, niklu, ołowiu i wanadu w obszarze złożowym KGHM Polska Miedź S.A. Doktorantka starannie zestawiała dane z Bilansu zasobów złóż kopalin w Polsce, archiwalnych dokumentacji złożowych oraz z publikacji surowcowych. Na podstawie danych z różnych okresów eksploatacji przedstawiła zakres koncentracji poszczególnych pierwiastków towarzyszących jak również ich średnie zawartości w poszczególnych typach litologicznych. Zestawienia te pozwalają prześledzić zmienność zawartości wybranych pierwiastków w rudach podczas eksploatacji złóż Cu-Ag w latach 1998-2005. Szkoda, że zbyt mała liczba danych nie umożliwiła zestawienia danych o dystrybucji kobaltu i wanadu w LGOM.

Stwierdza, powołując się także i na inne prace (np. Mucha i in., 2005), bardzo niską dokładność szacowania średnich zawartości pierwiastków towarzyszących w porównaniu z oszacowaniami zasobów Cu i Ag. Doktorantka formułuje ważne wnioski dotyczące dużej zmienności dystrybucji pierwiastków towarzyszących oraz charakterystyczne dla nich silne dodatnie asymetrie i wielomodalność rozkładów prawdopodobieństwa ze słabo zaznaczonymi

modami pobocznymi. W rozdziale tym, podobnie jak w całej pracy, uwagę zwraca stosowanie zapisów liczb dziesiętnych z kropką. Jednak w języku polskim separatorem dziesiętnym jest przecinek. Konieczna będzie korekta jeżeli planowana jest publikacja w języku polskim w krajowym czasopiśmie naukowym. Korekty wymaga również polska pisownia nazwy minerału – lelingit (s. 18), która poprawnie powinna być zapisana jako löllingit. Prawidłową polską pisownię minerałów można znaleźć np. w książce pt. „*Glosariusz Mineralów*” autorstwa wybitnych mineralogów z AGH - A. Manecki, M. Łodziński i J. Wrzak (Wyd. Mineral. Mineralpress, Kraków 2011). W rozdziale o ołowiu (s. 21) podano bogatą literaturę odnośnie dystrybucji ołowiu i jego strefowości wystąpień w formacji miedzionośnej na monoklinie przedsudeckiej. Jednak brak jest cytowania ważnej w tym zakresie pracy pt. „*Atlas metalogeniczny cechsztyńskiej serii miedzionośnej w Polsce*” autorstwa S. Oszczepalskiego i A. Rydzewskiego z 1997 (Państw. Inst. Geol. Wyd. Kart. PAE SA. Warszawa).

W tab. 4.6 (s. 24) podana została za B. Witkowską-Kita (2015) błędna informacja o występowaniu w Polsce samodzielnych złóż rud wanadu, które cytują: „*są małe i na ogół już wyeksploatowane*”.

W rozdziale 5 przedstawiona została metodyka opróbowania stosowana w obszarze górniczym Rudna oraz dodatkowo scharakteryzowano dwa opróbowania eksperymentalne, a także stosowaną w kopalni metodę obliczania zasobności miedzi oraz pierwiastków towarzyszących. Wyjaśnienia wymaga jednak sposób selekcji próbek dla wykonania analiz geostatystycznych ze względu na ich lokalizację w interwale bilansowym (np. w cienkim złożu w łupku) i/lub w strefie pozabilansowej rozciętej chodnikiem eksploatacyjnym.

Dla analiz geostatystycznych dysponowano danymi o zmiennej liczebności populacji w zakresie od ok. 680 do 734 próbek dla V, Ni, As i Co, ok. 3 300 próbek z danymi o zawartości Pb oraz ponad 10,2 tys. próbek z zawartościami Cu. W pracy w ogóle nie przedstawiono informacji o metodyce i miejscu wykonania oznaczeń pierwiastków chemicznych. Informacja taka byłaby użyteczna i jest konieczna w publikacji.

W kolejnych podrozdziałach opisane zostały podstawy metodyczne zastosowane w badaniach zmienności zasobności miedzi i wybranych pierwiastków towarzyszących w złożach LGOM. Szczegółowo przedstawiono teoretyczne podstawy badania zmienności zbiorów w ujęciu probabilistycznym jak również geostatystycznym. Doktorantka dostrzega liczne ograniczenia w poprawnym przeprowadzeniu estymacji zasobności wybranych pierwiastków. Zwraca uwagę na błędy pomiarów i oznaczeń parametrów składowych takich jak np. miąższość złoża, gęstość przestrzenna kopaliny czy siatka opróbowania. Dla rozwiązania problemów z szacowaniem zasobności pierwiastków zaproponowała aplikację klasycznych metod statystycznych dla określenia ich rozkładów prawdopodobieństwa, a dla oceny wielkości i zróżnicowania przestrzennego ich zasobności wykorzystanie metod geostatystycznych oraz modeli semiwariogramów. Dla realizacji tych celów wykorzystwała oprogramowanie Statistica 12, Isatis 16 oraz Surfer 12. Objaśnione zostały podstawy teoretyczne parametrów statystycznych wraz z wzorami oraz przykładami graficznymi różnych histogramów. Wśród parametrów statystycznych doktorantka pominęła jednak całkowicie średnią geometryczną, która obok średniej arytmetycznej i mediany stosowana jest powszechnie w charakterystykach surowcowych. Wymaga to krótkiego komentarza. W pisowni wzoru nr 6.11. (s. 32) w liczniku błędnie zapisana jest nazwa minimalnej wartości

badanego parametru, która poprawnie powinna być X_{\min} . Dodatkowo korekty wymaga pisownia (s. 32) poziomu istotności jako pierwszej litery alfabetu greckiego - α zamiast a.

Pozostałe opisy i wzory są poprawne oraz starannie zestawione i graficznie zilustrowane. Klasyfikacja zmienności parametrów oraz przyjęte kryteria podziału współczynników asymetrii zaprezentowane zostały w formie tabelarycznej. Niewątpliwie, doktorantka wykazała się dobrą znajomością nie tylko podstaw teorii miar statystycznych, ale co istotne wiedzą z zakresu rozkładów empirycznych i aplikacji odpowiednich testów. Zdaje sobie sprawę z ograniczeń ich stosowania jak np. współczynnika korelacji liniowej Pearsona. Jednak w zamian słusznie proponuje zastosowanie współczynnika korelacji rang Spearmana, który nie wymaga normalności rozkładu i jest mniej wrażliwy na wartości ekstremalne w populacjach zmiennych.

Dla przejrzystej interpretacji uzyskanych wyników proponuje, za różnymi autorami, zastosować odpowiednie klasyfikacje zmienności parametrów oraz kryteria podziału wartości współczynników asymetrii, korelacji i determinacji. Przestrzenną strukturę zróżnicowania zasobności pierwiastków towarzyszących w punktach lub blokach złożowych zaplanowała zbadać za pomocą różnych semiwariogramów i modeli oraz aplikację metod krigingu. Doktorantka podaje nam również szczegóły zastosowań konkretnych estymatorów w zależności od charakteru zmienności analizowanych parametrów. Wskazuje wyższość w zastosowaniu semiwariogramów względnych, ze względu na ich możliwości w niwelacji tzw. efektu wzrostu proporcjonalności parametrów oraz bezpośredniego porównania siły i zmienności różnego typu parametrów. Jednocześnie zaznacza, że dopasowanie modelu teoretycznego do obliczenia semiwariogramu powinno być poprzedzone analizą chmury punktów w celu eliminacji par anomalnie wysokich. Wyróżniła trzy główne typy modeli geostatystycznych (z asymptotą lub bez oraz losowy), które można dopasować do skonstruowanych semiwariogramów. Z kolei poprawność doboru modeli zweryfikowała za pomocą tzw. testu krzyżowego. Przedstawiła również podstawy badania anizotropii geometrycznej i strefowej dla zmienności parametrów złożowych, jak również klasyfikacji siły anizotropii. Powyższe podstawy metodyczne zilustrowane zostały interesującymi i poglądowymi semiwariogramami, również i z własnych publikacji zamieszczonych w literaturze specjalistycznej. W podrozdziale 6.3. doktorantka przedstawiła szczegółowo podstawy teoretyczne i metodykę interpolacji punktowej i blokowej dla przestrzennego rozmieszczenia i oszacowania zasobności wybranych pierwiastków towarzyszących oraz miedzi w LGOM. Dostrzega zalety, a także wady i ograniczenia w interpolacji przy aplikacji różnych metod geostatystycznych. Zaproponowany i wykonany zakres prac dotyczący zmienności dystrybucji wybranych pierwiastków w ujęciu probabilistycznym i geostatystycznym jest bardziej komplementarny niż dotychczas opracowywane dane w tym zakresie dla LGOM.

W kolejnym bardzo ciekawie zredagowanym rozdziale 7 doktorantka przedstawiła wyniki z prac własnych w zakresie wartości miar statystycznych Cu oraz pierwiastków towarzyszących (As, Co, Ni, Pb i V) w złożu Rudna, a także barwne histogramy oraz wykresy typu ramka-wąsy dla głównych serii litologicznych i złoża bilansowego. Zaprezentowała również wyniki testów normalności rozkładów dla zbadanych pierwiastków oraz możliwości dopasowania alternatywnego modelu teoretycznego dla statystycznej istotności rozkładu danych. Obliczona średnia miąższość serii złożowej bilansowej, która obejmuje serię skał

węglanowych, łupkowych i piaskowcowych wynosi 5,34 m, przy czym największy udział ma seria piaskowcowa (średnia arytmetyczna miąższości = 4,4 m), następnie seria węglanowa (1,12 m), a najmniejszy seria łupkowa (0,27 m). Zmienność serii złożowej jest duża (współczynnik zmienności 66% wg klasyfikacji Baryszewa), a rozkłady empiryczne miąższości serii litologicznych wykazują asymetrię w zakresie od słabej do umiarkowanej. Przedstawiona została bardzo ciekawa mapa miąższości złoża bilansowego, na której jest widoczny pasmowy przebieg wzdłuż kierunku NW-SE maksymalnych miąższości złoża pokrywających się z przebiegiem elewacji stropu piaskowców białego spągowca. Najwyższe średnie zawartości Cu obliczono dla serii łupkowej (10,82 %), a najwyższe średnie zasobności Cu wykazuje seria piaskowcowa (178 kg/m²). Dla wszystkich serii litologicznych stwierdzono zgodnie z klasyfikacją Baryszewa dużą zmienność zasobności Cu w obrębie złoża bilansowego. Badania normalności jej rozkładu na podstawie testu Kołmogorowa-Smirnowa wykazały, że nie ma możliwości ich aproksymacji rozkładem normalnym. Doktorantka przeprowadziła eksperymenty sprawdzające przy jakiej liczebności zbioru danych wyjściowych zasobności Cu jest możliwe opracowanie modelu teoretycznego, który byłby statystycznie istotny. Stwierdziła, że rozkład prawdopodobieństwa jest istotny, dla serii węglanowej gdy zostawimy 10% danych ze zbioru pierwotnego, dla serii łupkowej 50% danych, a dla serii piaskowcowej 90%. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdziła, że bardzo liczne zbiory danych nie zawsze gwarantują dopasowanie rozkładu teoretycznego do rozkładu prawdopodobieństwa badanej zmiennej.

W zakresie dystrybucji pierwiastków towarzyszących wykazujących bardzo dużą zmienność zasobności doktorantka opracowała liczne barwne załączniki graficzne oraz zestawiała tabele. Zwraca uwagę staranne i przejrzyste ich opracowanie, jednak można mieć pewne zastrzeżenia do braku wartości liczbowych poszczególnych klas wydzielonych na histogramach zasobności pierwiastków towarzyszących. Dotyczy to w szczególności histogramów przedstawiających dane podstawowe i dane bez usunięcia wartości anomalnych.

Z przeprowadzonej analizy statystycznej wyciągnięte zostały liczne i prawidłowe wnioski odnośnie: bardzo dużej zmienności zasobności pierwiastków towarzyszących w poszczególnych seriach litologicznych w złożu bilansowym, obecności w zbiorach licznych wartości anomalnie wysokich, czy uszeregowania pierwiastków według wzrastającej zmienności współczynnika zmienności zasobności w kolejności od niklu, poprzez wanad, kobalt, arsen aż do ołowiu wykazującego najwyższą zmienność. Wykazana została prawostronna asymetria rozkładów wszystkich badanych zasobności pierwiastków w zakresie od słabej (wanad w serii łupkowej) do skrajnie silnej (arsen i ołów). Mgr J. Auguścik wskazuje, że główną przyczyną tak wysokiej asymetrii rozkładów jest „wyspowy” charakter mineralizacji kruszcowych wzbogaconych w minerały Pb i As. Nie próbuje jednak wytłumaczyć dlaczego wanad wykazuje najmniejszą asymetrię rozkładów zasobności. Doktorantka stwierdza, że asymetria rozkładów wyklucza możliwość zastosowania rozkładu normalnego jako teoretycznego modelu rozkładu prawdopodobieństwa i w konsekwencji wiarygodnego prognozowania i oszacowania zasobów ołowiu, czy arsenu w złożu bilansowym. Z kolei dla zasobności niklu, wanadu oraz kobaltu możliwe jest dopasowanie dla niektórych serii litologicznych pojedynczych modeli statystycznie istotnych. Na przykład dla zasobności kobaltu i niklu dla bilansowej serii złożowej możliwe było dopasowanie rozkładów teoretycznych.

W dalszej części rozprawy w rozdziale 8. pt. „*Korelacja pomiędzy zasobnościami miedzi i pierwiastków towarzyszących złożom Cu-Ag LGOM*” doktorantka przedstawiła wyniki badań korelacji pomiędzy pierwiastkami nie dla całego obszaru złożowego LGOM lecz tylko dla złoża Rudna. Dlatego tytuł tego rozdziału wymaga korekty. Na początku rozdziału doktorantka krótko odnosi się do wyników prac innych autorów dotyczących korelacji liniowych pomiędzy miedzią a pierwiastkami towarzyszącymi w złożach formacji cechsztyńskiej. Niestety cytowana literatura ogranicza się do prac z okresu 1970-2007, a całkowicie pomija prace, które ukazały się w ostatniej dekadzie. Dlatego też, tylko w pewnym stopniu można się zgodzić ze stwierdzeniem doktorantki (s. 60, w. 9-13), cytując: „*że mimo statystycznej istotności współczynników korelacji brak jest praktycznych możliwości wykorzystania regresyjnych modeli zależności w procedurach obliczenia zasobów ze względu na generalnie zbyt słabą korelację*”. Jest to prawdziwe stwierdzenie w przypadku korelacji liniowych miedzi z takimi pierwiastkami towarzyszącymi jak As i Pb (rys. 8.1-2). Dokładna analiza danych wskazuje jednak, że w przypadku Cu i pozostałych pierwiastków towarzyszących (V, Ni i Co) może występować wyraźna korelacja liniowa np. w jednym typie rudy. Na przykład w rudzie węglanowej (rys. 8.1), czy pomiędzy Cu i V oraz Cu i Ni w rudzie łupkowej (rys. 8.1-2; Mikulski i in., 2018). Potwierdza to również sama doktorantka kilka wersów poniżej (s. 60, w. 31-33), gdzie stwierdza, cytując: „*Obliczone współczynniki korelacji rang Spearmana (r_s) wskazują na istnienie wyraźnej korelacji ($0,7 < r_s < 0,9$) jedynie między zasobnościami: Cu i Ni, As i Co, Co i Ni, Ni i V w serii łupkowej oraz zasobnościami: Co i Ni, Ni i V, Ni i Pb w serii węglanowej (rys. 8.2).*” Jednak kilka wersów poniżej doktorantka stwierdza ponownie, że „*otrzymane wyniki badania korelacji uniemożliwiają zastosowanie metody korelacyjnej (Mogarowskij, Rossiejkin 1964; Nieć 1990) do szacowania zasobów pierwiastków towarzyszących złożom miedzi, ponieważ nie stwierdzono przynajmniej wyraźnego związku korelacyjnego pomiędzy As, Co, Ni, Pb, V i głównym pierwiastkiem – miedzią (Cu)*”. Zdanie to jest tylko w części zgodne z wcześniejszym stwierdzeniem. Dodatkowo zupełnie nie przekonujące jest także uzasadnienie, że cytując: „*Metoda ta też nie może być stosowana w sytuacjach, gdy pierwiastki towarzyszące tworzą szereg własnych faz mineralnych, występując w postaci domieszek w wielu minerałach kruszczowych oraz tworzą związki metalogeniczne, jak ma to miejsce w przypadku analizowanych pierwiastków towarzyszących złożom Cu-Ag LGOM*”. Należy stwierdzić, że pierwiastki te występują właśnie w takich formach w przyrodzie, a LGOM nie jest tu wyjątkiem. Przyczyną były różnice w procesach geologicznych i fizyko-chemicznych zachodzące sukcesywnie podczas precypitacji różnych zespołów i paragenez mineralnych.

W kolejnej części rozprawy doktorskiej (rozdział 9.) przedstawione zostały szczegółowo wyniki analizy geostatystycznej zmienności zasobności miedzi i pierwiastków towarzyszących w złożu bilansowym Cu-Ag Rudna. Rozdział ten jest bardzo dobrze zredagowany i zawiera syntetyczne omówienie zastosowanych algorytmów i uzyskanych wyników badań z zakresu przestrzennej struktury zmienności zasobności wybranych pierwiastków. Metodyka, którą omówiono na wstępie w dysertacji została ponownie przypomniana i bardzo umiejętnie wykorzystana przy omawianiu kolejnych kroków podczas realizacji prac badawczych. Doktorantka znakomicie prezentuje tu swój warsztat badawczy oraz umiejętność korzystania z wszechstronnych narzędzi geostatystycznych. Braki w opróbowaniu i wynikach analiz niektórych pierwiastków (Pb, V i As) koryguje poprzez

zmniejszenie odległości dla obliczeń i racjonalnego doboru modelu geostatystycznego. Opracowała załączniki graficzne w postaci semiwariogramów charakteryzujących struktury zmienności zasobności Cu i innych pierwiastków towarzyszących w różnych seriach litologicznych. Modelowania semiwariogramów doświadczalnych zweryfikowała na poprawność doboru modelu geostatystycznego testem krzyżowym. Przedstawiła również w formie graficznej wyniki obliczeń dla udziału minimalnego składnika losowego i maksymalnego składnika nielosowego w strukturze zmienności badanych pierwiastków. Ważnym osiągnięciem naukowym doktorantki są także starannie opracowane mapy relatywnych semiwariogramów kierunkowych (n=50), które umożliwiły ocenę zmian zasobności analizowanych pierwiastków. Sukcesem badawczym jest opracowanie semiwariogramów dla kierunków ich maksymalnej i minimalnej zmienności oraz ich modeli. Wysokie wartości współczynników korelacji pomiędzy oszacowaną i rzeczywistą wartością miedzi dla wszystkich analizowanych serii litologicznych świadczą o wysokiej wiarygodności predykcji zasobności Cu metodami statystycznymi. Wykazano, że do odległości ok. 500 m zmienność zasobności Cu jest izotropowa, a powyżej tej odległości słabo anizotropowa. Stwierdzenie to ma ważny aspekt surowcowy, ponieważ umożliwia bardziej racjonalną gospodarkę złożem.

Istotnym dla analiz geostatystycznych okazało się zastosowanie „*chmury punktów*” dla semiwariogramów klasycznych, które umożliwiło w przypadku pierwiastków towarzyszących usunięcie ze zbiorów wartości anomalnych co skutkowało silnym obniżeniem amplitudy semiwariogramów dla poszczególnych pierwiastków w różnych typach litologicznych. W przypadku niklu okazało się, że obniżone amplitudy semiwariogramów dla oszacowania jego zasobności nie wykazały dużych błędów estymacji. Podsumowując ten rozdział mgr inż. J. Auguścik formułuje ważne stwierdzenie, że zróżnicowane udziały składnika nielosowego dla różnych typów estymatorów semiwariogramów nie miały dużego wpływu na wartości współczynnika korelacji pomiędzy oszacowaną i rzeczywistą wartością parametru w punktach opróbowania.

W kolejnych rozdziałach przedstawione zostały zmienności przestrzenne w dystrybucji i zasobności pierwiastków towarzyszących w złożu w świetle badań eksperymentalnych. Część wyników badań zaprezentowanych w rozdziale o lokalnej zmienności zasobności w złożu Rudna, została opublikowana w 2017 r. w materiałach międzynarodowej konferencji surowcowej oraz w czasopiśmie „*Górnictwo odkrywkowe*”. Doktorantka umiejętnie określiła podstawy metodyczne oraz zdefiniowała badanie zmienności jak również ograniczenia (np. tzw. „*efekt samorodka*”) w zakresie analizy geostatystycznej. Przeprowadzone dodatkowe opróbowania eksperymentalne, z uwagi na zamknięcie oddziału G-23 spowodowane wstrząsem tektonicznym w kopalni Rudna w dniu 29.11.2016 r., ograniczyły się tylko do serii łupkowej, która stanowi zaledwie 6% zasobów w tej kopalni. Dlatego wyniki analizy geostatystycznej z lokalnego opróbowania eksperymentalnego nr II nie są reprezentatywne dla całego złoża Rudna, a zaproponowana metodyka opróbowania wyrobisk, poprzez łączenie próbek na wybranym poziomie, dla oznaczeń pierwiastków wymagać będzie weryfikacji w całym obszarze LGOM.

Na stronie 79 (w. 1 od dołu) w tekście jest niepoprawne sformułowanie cytując: „*Jako miarę dobroci dopasowania modelu regresji...*” powinno być „*Jako miarę dobrego dopasowania modelu regresji...*”. W zakresie badań zmienności pionowej pierwiastków

uzyskane wyniki z opróbowania eksperymentalnego nr I, ze względu na niewielką liczbę próbek, są także słabo reprezentatywne. Z kolei analiza miar parametrów statystycznych wykazała, poza pojedynczymi wyjątkami, ogólną zbieżność średnich zawartości pierwiastków z opróbowań eksperymentalnych z danymi z rutynowych analiz kopalnianych. Ponadto, doktorantka wykazała, że najwyższe wahania współczynników zmienności zawartości w profilu pionowym wykazują Pb i As. Opracowane zostały również dane parametrów statystycznych oraz rankingi litologii wg malejącej wartości median zawartości Cu i pierwiastków towarzyszących. Zwracają uwagę bardzo starannie opracowane załączniki graficzne dystrybucji pierwiastków w profilu pionowym oraz dwukrotnie zaprezentowana mapka zawartości kobaltu w serii piaskowcowej w złożu Rudna. Chciałbym podkreślić, że zaprezentowane wyniki dotyczące zmienności w dystrybucji pierwiastków oraz stwierdzone prawidłowości i cechy charakterystyczne ich występowania są bardzo ważne dla racjonalnej gospodarki złożem. Najbogatsze w miedź i metale towarzyszące są serie łupkowe, ale zaobserwowała również, że często w stropowej części piaskowców następuje wzrost koncentracji arsenu oraz w pojedynczych próbkach również i kobaltu. Z kolei ołów gromadzi się ponad złożem bilansowym w serii węglanowej, a wanad głównie w serii łupkowej. Stwierdziła, również znacznie niższe koncentracje pierwiastków towarzyszących w granicach elewacji białego spągowca. Ogólne prawidłowości dystrybucji metali rozpoznane wcześniej zostały potwierdzone w rozprawie doktorskiej.

W kolejnych dwóch rozdziałach rozprawy mgr inż. J. Auguścik przedstawiła prawidłowości rozmieszczenia zasobności pierwiastków towarzyszących oraz metodykę i jej ograniczenia przy szacowaniu zasobów. Kolejność tych rozdziałów powinna być odwrotna najpierw opis metodyki, a potem prawidłowości w dystrybucji zasobów w złożu. Jest to uwaga redakcyjna, i należy podkreślić, że opracowanie obydwu rozdziałów świadczy o znajomości problematyki oraz umiejętności prowadzenia przez doktorantkę skomplikowanych analiz geostatystycznych. Oprócz map izoliniowych rozmieszczenia przybliżonych zasobności As, Co, Ni, V i Pb opracowane zostały również mapy prawdopodobieństwa dla wystąpień tych pierwiastków, a także ranking dokładności oszacowania ich zasobności za pomocą różnych miar błędu względnego krigingu blokowego oraz analiza wiarygodności punktowego oszacowania zasobności Ni i Pb dla fragmentu złoża Rudna. Stwierdza, że w złożu bilansowym o najwyższych zasobnościach Ni, Pb i V decydują ich duże zasobności w serii łupkowej, a As i Co w serii piaskowcowej (odpowiednio średnie zasobności = 561 i 277 g/m²).

Podstawy teoretyczne oraz zalety i ograniczenia w szacowaniu zasobów pierwiastków śladowych za pomocą metod klasycznych oraz metod pośrednich - korelacyjnej oraz mineralogicznej zostały szczegółowo omówione w dalszej części rozprawy. Stwierdziła dużą niedoskonałość i brak możliwości ich aplikacji dla wiarygodnej oceny zasobności pierwiastków towarzyszących w złożu Rudna. W zamian zastosowała szczegółowe badania z zakresu zaawansowanej analizy geostatystycznej zmienności, prognozowania i wiarygodności zmiennej zasobności dla pierwiastków towarzyszących rudzie Cu w Rudnej. Z przeprowadzonej analizy wyciąga logiczne wnioski, które umożliwiają jej udowodnienie postawionych tez rozprawy doktorskiej. Do szacowania średniej zasobności As, Co, Ni, Pb i V wykorzystwała metodę krigingu zwyczajnego blokowego, a dodatkowo dla arsenu również krigingu poligonowego i indyktorowego. Wyniki analiz dla arsenu za pomocą krigingu

indykatorowego przedstawiła w postaci mapy prawdopodobieństwa wystąpień As o zawartościach >100 g/Mg oraz mapy oszacowania średniej zasobności arsenu w złożu bilansowym. Doktorantka stwierdza, że zaproponowana metodyka i przeprowadzona analiza może być wykorzystana do obliczenia zasobności pierwiastków strategicznych takich jak np. kobalt czy wanad, gdy ich odzysk stanie się technologicznie możliwy i ekonomicznie opłacalny. Jest to bardzo ważne stwierdzenie, szczególnie istotne w przypadku wielkich oczekiwań, jeżeli chodzi o opracowanie technologii odzysku kobaltu w procesie przeróbki rud siarczkowych przez KGHM Polska Miedź S.A. Szacunkowe zasoby tego strategicznego pierwiastka w rudach Cu-Ag na monoklinie przedsudeckiej wynoszą ok. 100 tys. Mg (Mikulski i in., 2018).

W następnym bardzo ważnym rozdziale dokonała rankingu dokładności oszacowań średniej zasobności oraz zasobów pierwiastków towarzyszących za pomocą programu ISATIS. Wykazała, w porównaniu do wcześniej publikowanych danych (Mucha i in., 2005), że zaprezentowany w pracy ranking błędów względnych oszacowań jest bardziej wiarygodny gdyż jest oparty na większych zbiorach danych z wyrobisk górniczych i został wykonany dla zasobności pierwiastków, a nie do ich zawartości. Błędy oszacowań są bardzo ważnym parametrem geologiczno-górnictwem, na który składają się błędy pomiarów i oznaczeń różnych elementów składowych. Wykazała, że najniższymi błędami charakteryzują się oszacowania dla niklu i wanadu, nieznacznie większymi dla kobaltu, a znacznie większymi dla ołowiu i arsenu. Doktorantka stwierdziła, że liczba punktów i ich wzajemne rozmieszczenie ma duży wpływ na wielkość błędu względnego jego zasobności. Zobrazowała to dobrze zamieszczając odpowiednie mapki (dla bloków 1x1 km) w odniesieniu do poszczególnych pierwiastków towarzyszących. Stwierdziła, że generalnie mediany błędów względnych zasobności pierwiastków towarzyszących, z wyjątkiem ołowiu, są wyższe w obliczeniach metodą statystyczną niż metodą geostatystyczną.

W tabelce 13.1. przedstawiającej zestawienie median względnych błędów standardowych krigingu blokowego (w blokach 1x1 km) przy zastosowaniu różnych estymatorów semiwariogramów relatywnych w ostatniej kolumnie przedstawione dane dotyczą wanadu, a nie ołowiu. Na stronie 110 (w. 13) poprawnie powinno być przedstawiają zamiast przestawiają.

W jednym z końcowych rozdziałów mgr inż. J. Auguścik przeprowadziła badanie wiarygodności punktowego oszacowania zasobności dla niklu i ołowiu wykazujących najmniejsze i największe zróżnicowanie współczynników zmienności wśród pierwiastków towarzyszących w złożu Rudna. Stwierdza, że o wiarygodności oceny wyników interpolacji decyduje gęstość sieci opróbowania a nie dobór metod interpolacji. Dla przeprowadzenia obliczeń, konsekwentnie stosuje wartość mediany słusznie tłumacząc, że zastosowanie średniej arytmetycznej skutkuje zawyżeniem wyników z uwagi na uwzględnienie wartości anomalnych. Jednak podobnie jak w całej pracy pomija możliwość zastosowania w obliczeniach wartości średniej geometrycznej. Wydaje się, że interesującym dla pracy byłoby porównanie dla wybranej analizy wartości mediany i średniej geometrycznej dla poszczególnych pierwiastków. Dlatego proszę ponownie o krótkie uzasadnienie wyższości mediany nad średnią geometryczną w badaniach geostatystycznych dotyczących zmienności zasobności i oszacowań zasobów pierwiastków towarzyszących w rudzie bilansowej w złożach LGOM.

Na rys. 13.7 dla wykresów słupkowych zasobności niklu w zbiorze podstawowym podane w wartościach liczbowych procentowe udziały poszczególnych klas wynoszą w sumie 101% zamiast 100%.

W rozdziale 14 będącym podsumowaniem prac w rozprawie doktorskiej, mgr inż. J. Auguścik zestawiała w punktach najważniejsze rezultaty badań w czterech podrozdziałach. Przedstawiła wyniki z przeprowadzonych analiz: statystycznej i geostatystycznej, badań struktury zmienności zasobności pierwiastków towarzyszących, jak również ich zmienności lokalnej i szacowania ich zasobności. Zaprezentowane wnioski i stwierdzenia są logiczne i zgodne z przeprowadzonymi badaniami opartymi na aplikacji różnorodnych metod geostatystycznych dla szacowania zmienności zasobności pierwiastków w bilansowym złożu Cu-Ag Rudna. Doktorantka zaprezentowała nie tylko podstawy teoretyczne różnych metod statystycznych oraz geostatystycznych, ale w sposób przekonujący potrafiła je zastosować dla rozwiązania i udowodnienia postawionych tez rozprawy doktorskiej.

W przedostatnim rozdziale przedstawiła wnioski końcowe o charakterze poznawczym, metodycznym i praktycznym. Jednym z najważniejszych wniosków poznawczych jest stwierdzenie, że wykazana eksperymentalnie bardzo duża lokalna zmienność zasobności pierwiastków wynika z naturalnego ich zróżnicowania w małej skali obserwacji, a w mniejszym stopniu z błędów opróbowania. Głównym wnioskiem o charakterze metodycznym jest stwierdzenie, że do wyznaczania w granicach złoża bilansowego stref wzbogacenia pierwiastków towarzyszących zaleca się stosowanie krigingu indykatorowego, a do oszacowania średniej zasobności metodę krigingu zwyczajowego poligonowego. Z kolei wśród wniosków o charakterze praktycznym stwierdza, że aktualne systemy opróbowania w blokach o wymiarach 1x1 km i mniejszych mogą być traktowane jedynie jako szacunkowe w kategorii D rozpoznania zasobów. Właściwe szacowanie zasobów i parametrów zmienności pierwiastków towarzyszących powinno być wykonywane z zastosowaniem różnych metod geostatystycznych zaprezentowanych w rozprawie doktorskiej. Zaprezentowane przez doktorantkę wnioski o charakterze aplikacyjnym, powinny wspomóc metody szacowania zmienności zasobów pierwiastków towarzyszących w zakładach górniczych złóż LGOM.

Podsumowanie

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska autorstwa mgr inż. Justyny Auguścik jest na wysokim poziomie naukowym. Język dysertacji jest poprawny stylistycznie, a układ pracy logiczny. Zwraca uwagę staranna redakcja tekstu oraz dobór i wysoki poziom merytoryczny oraz techniczny ilustracji graficznych. Założone tezy dysertacji doktorskiej zostały osiągnięte i w sposób przekonujący udowodnione.

Doktorantka zaprezentowała szczegółowe wyniki własnych prac dotyczących aplikacji metod statystycznych i zaawansowanych metod geostatystycznych dla określenia struktury zmienności oraz metodyki szacowania zasobów wytypowanych pierwiastków towarzyszących (As, Co, Ni, V i Pb) złożom Cu-Ag na monoklinie przedsudeckiej. Badania oparte zostały na wynikach ze standardowych opróbowań na złożu Rudna oraz na wynikach z własnych opróbowań eksperymentalnych. Wykazała się umiejętnością prowadzenia samodzielnych prac i doboru optymalnej metodyki dla przeprowadzenia zaawansowanych analiz geostatystycznych w zakresie zbadania struktury zmienności zasobności oraz zasobów

pierwiastków towarzyszących rudom Cu-Ag w formacji cechsztyńskiej. Z przeprowadzonych badań wyciągnęła liczne i poprawne wnioski odnośnie uwarunkowań i doboru odpowiednich metod dla szacowania zmienności zasobów pierwiastków towarzyszących w bilansowym złożu Cu-Ag Rudna. Zaproponowała, na bazie zaawansowanych metod geostatystycznych, nową metodykę szacowania zasobów i struktur zmienności pierwiastków towarzyszących rudom Cu-Ag w LGOM. Należy podkreślić bardzo ważny aplikacyjny charakter rozprawy doktorskiej oraz prawidłową interpretację uzyskanych wyników prac badawczych, które powinny być zweryfikowane i ewentualnie wdrożone jako element szacowania zasobów pierwiastków towarzyszących i ich zmienności w ramach racjonalnej gospodarki zasobami w złożach w LGOM.

Wniosek końcowy

Po przeprowadzeniu krytycznej oceny przedłożonej rozprawy doktorskiej mgr inż. Justyny Auguścik pt. „*Struktura zmienności oraz metodyka szacowania zasobów wytypowanych pierwiastków towarzyszących złożom Cu-Ag LGOM*” stwierdzam, że spełnia ona wymagania zgodnie z przepisami ustawy z dnia 14 marca 2003 r. (Dz.U. Nr 65. Poz. 595 z późn. zm.) o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki.

Rozprawa doktorska stanowi oryginalny wkład w zakresie zbadania struktury zmienności oraz opracowania nowej metodyki szacowania zasobów miedzi i pierwiastków towarzyszących w bilansowych złożach cechsztyńskiej formacji Cu-Ag na monoklinie przedsudeckiej. Wykonana rozprawa dowodzi umiejętności doktorantki w zakresie wykonywania samodzielnych naukowych badań geostatystycznych w zakresie geologii surowcowej oraz prowadzenia zaawansowanych i komplementarnych badań umożliwiających szacowanie zasobów oraz struktury zmienności pierwiastków towarzyszących w LGOM. Zaprezentowane wyniki badań oraz zaproponowana metodyka mają bardzo ważny aspekt aplikacyjny.

Stawiam wniosek do Rady Naukowej Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisław Staszica w Krakowie o dopuszczenie mgr inż. Justyny Auguścik do dalszego postępowania przewidzianego regulaminem przewodu doktorskiego.



