

ZMIENNOŚĆ LOKALNA ZASOBNOŚCI JEDNOSTKOWEJ NIKLU I WANADU W ZŁOŻU „RUDNA” W ŚWIETLE BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

LOCAL VARIABILITY OF NICKEL AND VANADIUM ACCUMULATION INDEX IN THE „RUDNA” DEPOSITS IN THE LIGHT OF EXPERIMENTAL RESEARCH

Justyna Auguścik - AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, WGGiOŚ, Katedra Geologii Złóżowej i Górnictwa

W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych podjętych w celu określenia zmienności lokalnej zasobności niklu i wanadu dla serii łupkowej we fragmencie złoża „Rudna” Cu-Ag LGOM. Zmienność lokalną zdefiniowano jako zróżnicowanie parametru złożowego w próbach pobranych w bezpośrednim sąsiedztwie. Wybór pierwiastków towarzyszących złożom miedzi do badań nie był przypadkowy, wybrano pierwiastki strategiczne dla Polski. Badania przeprowadzono metodami statystycznymi i geostatystycznymi. Stwierdzono, że zmienność zasobności jednostkowej niklu i wanadu w serii łupkowej dla całego złoża i w skali lokalnej jest duża (rzędu 70 – 80%). Przeprowadzona ocena statystycznej istotności różnic dla danych (próbek) sparowanych za pomocą testów: t-Studenta, testu rangowanych znaków wykazała, że otrzymane wyniki oznaczeń Ni i V nie są obciążone błędem systematycznym. Badania geostatystyczne wykazały, że na wielkość zmienności lokalnej zasobności obu pierwiastków znacznie większy wpływ (prawie dwukrotnie) ma naturalna zmienność pierwiastków, niż błędy związane z procesem opróbowania.

Słowa kluczowe: zmienność lokalna, semiwariogram, geostatystyka, nikiel, wanad, łupek, złożo Cu-Ag

The paper presents the results of the research on local variability of the accumulation index of nickel and vanadium for the shale ore in a part of the Cu-Ag LGOM “Rudna” deposit. The local variability was defined in this case as the variation of the reservoir parameter in samples taken at the smallest distance from one another. The choice of elements accompanying (Ni, V) copper deposits for the analysis was not coincidental – these elements are of strategic importance for Poland. To analyse the results of the experimental sampling, statistical and geostatistical methods were used. It was ascertained that the variability of nickel and vanadium the shale ore for the whole deposit and in the local scale is high (coefficients of variation from 70 to 80%). The performed estimation of statistical significance of differences for the data paired using the t-test and the signed rank test showed that the received results of determining are not encumbered with statistical error. The geostatistical description of the local variability showed a much greater (almost twice higher) effect of natural variation of nickel and vanadium on the magnitude of local variability than errors related to the sampling process.

Keywords: local variability, semivariogram, geostatistics, nickel, vanadium, shale, Cu-Ag deposit

Wstęp

Zmienność lokalna zasobności jednostkowej niklu i wanadu w złożach Cu-Ag LGOM nie była jeszcze przedmiotem badań, dlatego uznano za zasadne podjęcie próby jej ilościowego opisu. Zmienność lokalna jest pojęciem względnym związanym ze skalą obserwacji pomiarów prowadzonych w złożu. Zmienność ta definiowana jest w literaturze najczęściej jako zmienność analizowanego parametru w skali obserwacji mniejszej niż podstawowy rozstaw prób pobieranych w ramach rutynowego opróbowania złoża [14,17].

Przez zmienność lokalną, rozumie się zróżnicowanie parametru złożowego w próbach pobranych w możliwie najmniejszej, do kilku centymetrów, odległości od siebie (przy zachowaniu odrębności prób).

Zmienność lokalna składa się z dwóch elementów wynikających z błędów opróbowania oraz naturalnej zmienności

parametrów w małej skali obserwacji. Wariancja błędu opróbowania jest równa sumie trzech komponentów, wariancji błędów poboru prób, wariancji błędów przygotowania próbki do analizy chemicznej, wariancji błędów analiz laboratoryjnych [24]. W związku z tym, wielkość zmienności lokalnej, zależy w głównej mierze od naturalnej zmienności samej mineralizacji w małej skali obserwacji oraz od szeroko rozumianych błędów opróbowania [17].

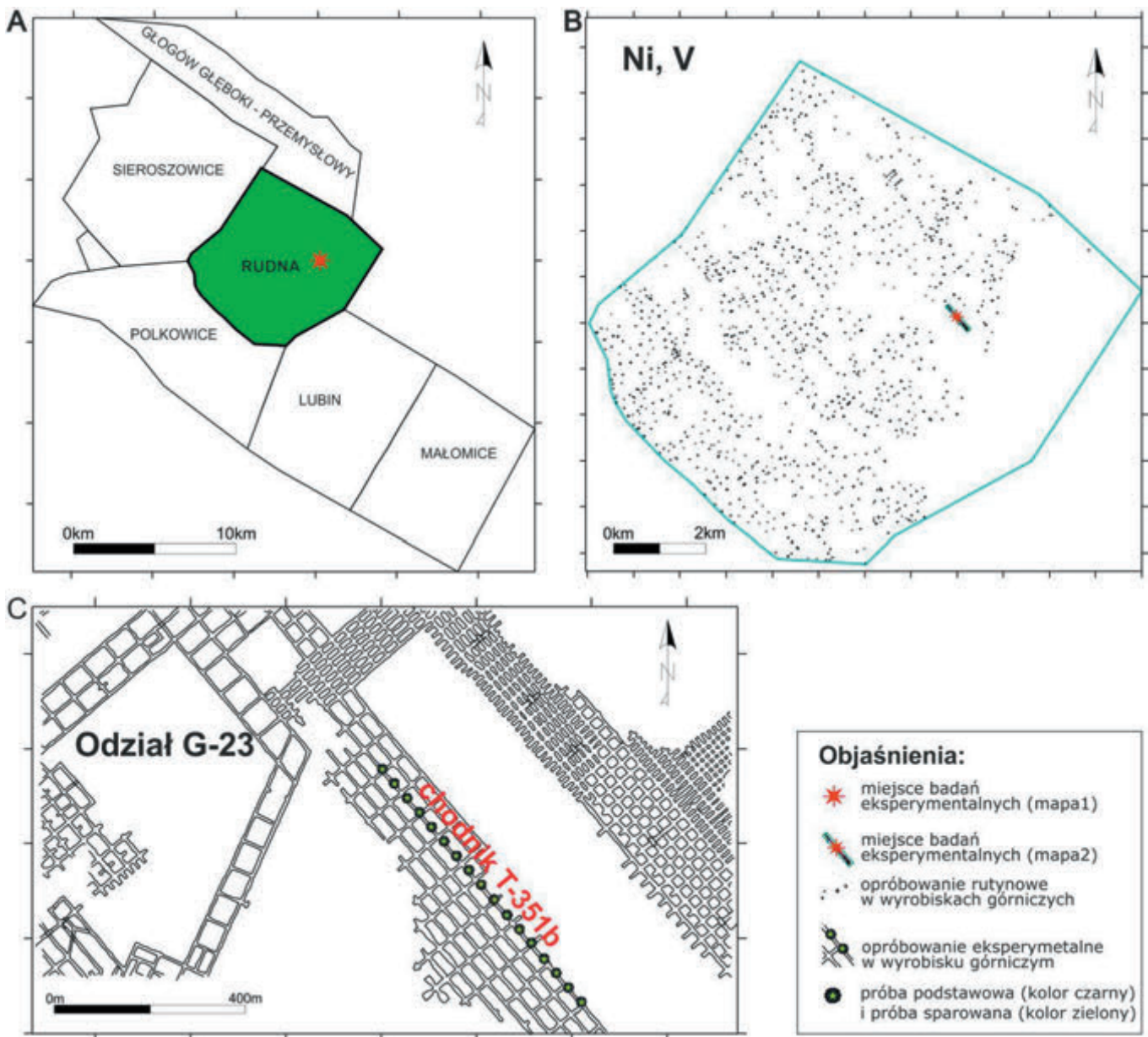
W geostatystyce Matherona pojęcie zmienności lokalnej jest bliskie pojęciu efektu samorodków (nugget effect) a jego wariancja oznaczana jest symbolem C_0 . Charakterystykę tego zagadnienia i trudności jej ilościowego wyrażenia można znaleźć w wielu publikacjach [1, 2, 3, 5, 7, 6, 8, 9, 13, 15, 16, 21, 17, 19, 23, 27]. Nie do końca fortunna nazwa „nugget effect”, związana jest ze złożami złota formacji Witwatersrand (RPA), gdzie pojawienie się samorodka w próbce, powodowało znaczące podwyższenie zmienności lokalnej zawartości tego pierwiastka [3].

Zastosowanie metod geostatystycznych do szacowania wartości parametru złożowego wymaga wcześniejszego skonstruowania semiwariogramu empirycznego (funkcji opisującej zróżnicowanie jego wartości w zależności od rozstawu prób) i aproksymacji go funkcją analityczną ciągłą (modelem geostatystycznym) (rys. 2). Zmienność lokalna wyrażona jest w równaniu semiwariogramu jako C_0 [23]. Krytycznym elementem modelowania struktury zmienności parametru jest właściwe określenie poziomu C_0 , który wpływa na późniejszą ocenę dokładności szacowania zasobów. Na ogół wyznaczenia C_0 dokonuje się arbitralnie przez dopasowanie modelu do paru pierwszych punktów semiwariogramu empirycznego. Takie podejście może skutkować niewłaściwym doбором modelu zmienności i przeszacowaniem lub niedoszacowaniem wariancji parametru w zakresie małych odległości pomiędzy próbami [18].

Cel, zakres i materiał podstawowy badań

Zasadniczym celem prezentowanych badań była analiza zmienności lokalnej zasobności jednostkowej niklu (Ni) i wanadu (V), pierwiastków towarzyszących złożom Cu-Ag LGOM. Badania przeprowadzono w części obszaru górniczego Kopalni Rudna. Do badań eksperymentalnych wybrano serię łupkową ponieważ w jej obrębie stwierdzono najwyższą średnią zawartość wanadu (791 ppm). Znacznie niższe średnie zawartości tego pierwiastka odnotowano dla serii węglanowej (132 ppm) i dla serii piaskowcowej (31 ppm). Średnie zawartości niklu dla poszczególnych serii litologicznych są bardzo zbliżone do siebie (seria łupkowa – 282 ppm, seria piaskowcowa – 280 ppm i seria węglanowa – 279 ppm). Wybrane do badań pierwiastki uważane są za strategiczne dla Polski [28].

W złożu rud Cu-Ag LGOM pierwiastki towarzyszące występują w postaci minerałów własnych oraz w formie do-



Rys. 1. Lokalizacja kopalni Rudna na tle innych kopalń Cu-Ag LGOM (A), rozmieszczenie punktów opróbowania złoża Rudna dla oznaczeń zawartości Ni i V w serii łupkowej (B) oraz stanowisko badań eksperymentalnych (C).

Fig. 1. Localization of the research area (A), distribution of samples for determination of nickel, vanadium accumulation index in the shale ore (B) and the research place (C).

mieszek izomorficznych w innych minerałach, w substancji organicznej oraz w minerałach ilastych. Nikiel tworzy minerały własne w formie siarczków oraz arsenków i siarkosoli: nikielin – NiAs, rammelsbergit – NiAs₂, chloantyt – (NiCo)₂As₃, gersdorfit – (NiAsS). Występuje on także jako domieszka w pirycie oraz w mniejszej ilości w chalcocynie i bornicie [12]. Wanad jest pierwiastkiem powszechnie występującym w złożu miedzi, natomiast nie tworzy minerałów własnych i nie stwierdzono także domieszek tego pierwiastka w minerałach kruszcowych. Główne koncentracje wanadu związane są z substancją organiczną (w karogenie zawartość wanadu wynosi od 0,2 do 0,45%) [12]. Pierwiastki objęte badaniami zostały udokumentowane w złożach Cu-Ag LGOM. Ich zasoby są aktualizowane w corocznych operatach ewidencyjnych na podstawie wyników bieżącego opróbowania geologicznego. Nikiel jest odzyskiwany jako siarczan niklu, natomiast wanadu aktualnie się nie odzyskuje.

Materiał podstawowy badań stanowiły wyniki oznaczeń zawartości Ni i V w 34 próbach pobranych w ramach opróbowania eksperymentalnego (rys. 1) oraz wyniki oznaczeń tych metali w próbach pobranych w ramach rutynowego (kopalnianego) opróbowania złoża.

Opróbowanie eksperymentalne serii łupkowej wykonano w oddziale G–23 wzdłuż wyrobiska chodnikowego T–351b na odcinku o długości 640 m. Miąższość serii łupkowej reprezentowanej w tym obszarze przez łupek dolomityczny była rzędu od 0,03 do 0,3 m. Na każdym stanowisku badawczym pobrano w profilu pionowym podwójne (podstawowe i sparowane) próby bruzdowe lub pseudo-bruzdowe w zależności od miąższości serii łupkowej. Próby podstawowe pobierano co 40 m, natomiast próby sparowane w odległości do kilku centymetrów od próby podstawowej (rys. 1C). Łącznie pobrano z ociosów wyrobiska 34 próby, 17 prób podstawowych oraz 17 prób sparowanych. Masa całkowita indywidualnej próby wynosiła około 300 g. Analiza laboratoryjna pobranych prób obejmowała ich przygotowanie do analizy chemicznej oraz oznaczenie pierwiastków głównych: miedzi (Cu), srebra (Ag) i innych pierwiastków towarzyszących złożom Cu-Ag LGOM m.in.: Ni i V. Analizę chemiczną pobranych prób przeprowadzono w jednym z krajowych laboratoriów, techniką XRF. Otrzymane wyniki opracowano klasycznymi metodami statystycznymi oraz geostatystycznymi.

Dla celów porównawczych wykorzystano także dane archiwalne zawierające wyniki oznaczeń niklu i wanadu w próbach pobieranych w wyrobiskach górniczych w ramach rutynowego opróbowania złoża na zawartość Cu i Ag. Średnia odległość między punktami opróbowań dla tych oznaczeń zawartości niklu i wanadu wynosiła około 210 m (rys. 1B).

Metodyka badań

Ilościową charakterystykę zmienności zasobności jednostkowej Ni w serii łupkowej (W-Ni-I) i V (W-V-I) wykonano przy zastosowaniu metod statystycznych i geostatystycznych. Opis statystyczny polegał na: obliczeniu podstawowych miar statystycznych, badaniu normalności rozkładu na podstawie zestandaryzowanych współczynników asymetrii i ekscesu oraz przeprowadzeniu testów dla danych sparowanych (t-Studenta, rangowanych znaków) w celu zbadania występowania błędu systematycznego [10]. Testy te pozwalają na sprawdzenie hi-

potęzy czy dwie próby sparowane pochodzą z jednej populacji. Odbywa się to przez obliczenie tzw. prawdopodobieństwa testowego (p-value), definiującego najostrzejszy poziom istotności, przy którym można odrzucić testowaną hipotezę na podstawie danych empirycznych, którymi się dysponuje [26]. Gdy dla najczęściej stosowanego w geologii górniczej poziomu istotności $\alpha=0,05$ zachodzi relacja $p\text{-value} \leq \alpha=0,05$ to hipotezę zerową należy odrzucić, gdyż próby sparowane pochodzą z jednej populacji [10].

Dodatkowo określono siłę korelacji i postacie regresji liniowej (metodą najmniejszych kwadratów) pomiędzy zasobnościami pierwiastków stwierdzonymi w próbach podstawowych i próbach sparowanych [20, 25].

Geostatystyczne badania struktury przestrzennego zróżnicowania zasobności niklu i wanadu wykonano stosując semiwariogram empiryczny (próbkowy) relatywny typu „pairwise” [11]

wyznaczany ze wzoru:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n_h} \sum_{i=1}^{n_h} \frac{(z_{i+h} - z_i)^2}{\left(\frac{z_{i+h} - z_i}{2}\right)^2} \quad (1)$$

gdzie: n_h - liczba par próbek oddległych o odcinek „h”, z_i, z_{i+h} - wartości badanego parametru (zasobności pierwiastków) w punktach oddległych o odcinek „h”.

W artykule podjęto próbę wyliczenia wartości składowych wariancji zmienności lokalnej parametru złożowego (według poniższego schematu), kierując się metodami podanymi przez Abzalova [1].

Pierwszy etap badań obejmował obliczenie semiwariogramów empirycznych relatywnych typu „pairwise” dla zasobności niklu i wanadu, następnie aproksymację ich funkcją analityczną ciągłą (modelem geostatystycznym). Model semiwariogramu empirycznego skonstruowanego dla danych z opróbowania eksperymentalnego będzie dalej nazywany modelem lokalnym. W oparciu o ten model odczytano relatywną wariancję zmienności lokalnej (C_0).

W kolejnym etapie wyliczono wariancje błędów relatywnych opróbowania (σ_{RSV}^2) zarówno dla zasobności niklu i wanadu stosując wzór [1]:

$$\sigma_{RSV}^2 = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^{n_h} \frac{(a_i - b_i)^2}{(a_i + b_i)^2} \quad (2)$$

gdzie: n - liczba par próbek, a_i - zasobność pierwiastka w próbie podstawowej, b_i - zasobność pierwiastka w próbie sparowanej.

W ostatnim etapie badań obliczono relatywną wariancję błędu wynikającą ze zmienności naturalnej (geologicznej) pierwiastków, poprzez odjęcie od poziomu C_0 , odczytanego z modelu lokalnego, obliczonej wariancji błędu względnego opróbowania (σ_{RSV}^2). Schemat obliczeń składowych zmienności lokalnej przedstawiono na rysunku 2.

Wyniki badań

Analiza statystyczna została wykonana dla zasobności niklu i wanadu, pierwiastków towarzyszącym złożom Cu-Ag LGOM zarówno dla opróbowania eksperymentalnego, jak i rutynowego. Obliczone podstawowe miary statystyczne zasobności pierwiastków zamieszczono w tabeli 1. Badania wyka-

zały, że empiryczne rozkłady prawdopodobieństwa zasobności Ni i V dla opróbowania eksperymentalnego i rutynowego są prawostronnie asymetryczne oraz charakteryzują się asymetrią od słabej do umiarkowanej. W przypadku opróbowania rutynowego dla zasobności niklu i wanadu stwierdzono występowanie „odstających” i pojedynczych wartości anomalnych, które zostały zweryfikowane na podstawie chmury punktów semiwariogramu [4]. Zmienność zasobności Ni i V wyrażona za pomocą współczynnika zmienności jest porównywalna ze zmiennością głównego metalu (Cu) zarówno dla opróbowania eksperymentalnego jak i rutynowego. Na podstawie klasyfikacji Baryszewa ich zmienność można określić jako dużą. Przeprowadzone na podstawie zestandaryzowanych współczynników asymetrii i ekscesu testowanie normalności rozkładu zasobności Ni i V dla opróbowania rutynowego we wszystkich przypadkach odrzuca hipotezę o normalności rozkładów (tab. 1). W przypadku opróbowania eksperymentalnego brak jest podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej o normalności rozkładu.

Przeprowadzona ocena statystycznej istotności różnic dla danych sparowanych, z wykorzystaniem testów t-Studenta i rangowanych znaków, wykazała, że otrzymane wyniki oznaczeń nie są obciążone błędem systematycznym (tab. 2). Różnice zasobności Ni i V między próbą podstawową i sparowaną zilustrowano również na rysunku 3. Największą różnicę absolutną stwierdzono dla wanadu, która wynosiła 237 [g/m²] (dla prób 3–3*), natomiast około dwa razy niższą otrzymano dla niklu (dla prób 11–11*). Zdecydowanie większe różnice absolutne otrzymano dla zasobności wanadu, z medianą na poziomie 54 [g/m²], natomiast dla niklu prawie dwa razy niższą. Zmienność obliczonych różnic absolutnych jest duża, nieznacznie mniejsza dla wanadu (87,9%) niż dla niklu (88,3%).

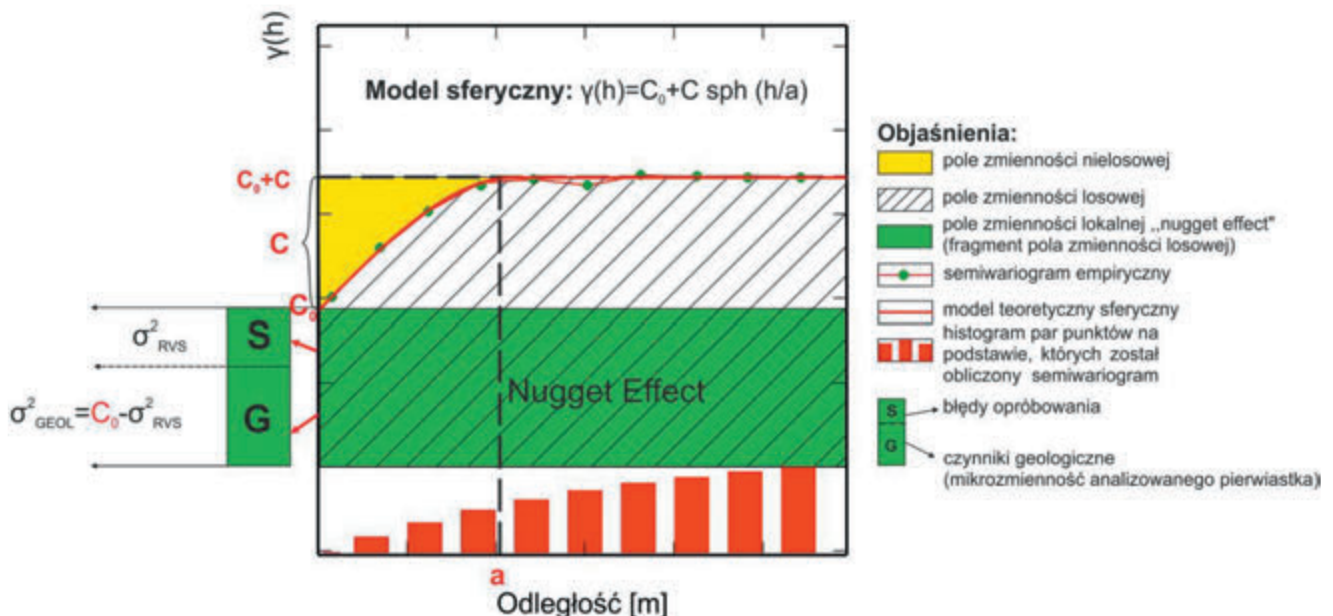
Model zależności zasobności niklu w próbach podstawowych i sparowanych określony dla danych z opróbowania eksperymentalnego cechuje się wysokim stopniem dopasowania,

ze współczynnikiem determinacji rzędu 81% (rys. 5). Zgodnie z klasyfikacją Niecia i in. (2012) korelację dla niklu i wanadu można uznać za bardzo wyraźną ($80\% \leq R^2 < 100\%$) [22]. W przypadku wanadu stwierdzono jeszcze wyższy stopień dopasowania modelu liniowego do zależności empirycznych, gdzie współczynnik determinacji (R^2) był równy 94% (rys. 5).

Testowania parametrów modeli liniowych (b_0 – wyraz wolny, b_1 – współczynnik kierunkowy) wykazały w obu przypadkach brak podstaw do odrzucenia hipotezy o niewystępowaniu błędu systematycznego dla referencyjnego poziomu istotności $\alpha=0,05$ przy czym zarówno błędu systematycznego stałego ($b_0 \approx 0$) jak i błędu systematycznego proporcjonalnego ($b_1 \approx 1$) (tab. 4), co stanowi potwierdzenie wyników badań uzyskanych przy zastosowaniu wspomnianych wcześniej testów: t-Studenta i rangowanych znaków.

Badania struktury zmienności zasobności niklu i wanadu w ujęciu geostatystycznym wykazały znacznie wyższy poziom maksymalnej zmienności parametru dla opróbowania eksperymentalnego niż dla opróbowania rutynowego (rys. 5). W przypadku głównego metalu (Cu) zaobserwowano tę samą zależność. Należy jednak pamiętać, że opróbowanie eksperymentalne zostało wykonane tylko w jednym wyrobisku. Definitywne rozstrzygnięcie zagadnienia wielkości zmienności lokalnej badanych parametrów wymaga przeprowadzenia podobnego opróbowania eksperymentalnego na kilku stanowiskach badawczych w innych częściach złoża. Stwierdzono również nieznacznie wyższy poziom zmienności lokalnej w przypadku niklu niż wanadu (rys. 5). Prawdopodobnie jest to spowodowane tym, iż pierwiastek ten tworzy minerały własne w odróżnieniu od wanadu, który występuje głównie w formie rozproszonej, jako domieszka w substancji organicznej.

Oszacowane wariancje zmienności lokalnej (Ni i V) dla opróbowania eksperymentalnego są nieznacznie niższe od estymowanych na podstawie danych z opróbowania rutynowego (rys. 5).



Rys. 2. Przykładowy semiwariogram relatywny „pairwise” wraz z dopasowanym modelem sferycznym (Abzalov 2011[1], zmodyfikowany)

Objaśnienia: $\gamma(h)$ – wartości semiwariogramu relatywnego „pairwise”, C_0 – wariancja relatywna zmienności lokalnej, C – wariancja relatywna zmienności przestrzennej (maksymalny udział składnika nielosowego zmienności), a – zasięg semiwariogramu, $C_0 + C$ – wartość relatywnej wariancji teoretycznej, σ_{RVS}^2 – wariancja relatywnego błędu opróbowania, σ_{GEOL}^2 – wariancję relatywną błędów związaną ze zmiennością naturalną analizowanych pierwiastków (błędy wynikające z czynników geologicznych).

Fig. 2. For example „pairwise” relative semivariogram with spherical model (Abzalov 2011[1], modified). Explanations: $\gamma(h)$ – the value of „pairwise” relative semivariogram, C_0 – relative variance of the local variability, C – relative variance of the spatial variability (non-random component of variability), a – range of semivariogram, σ_{RVS}^2 – relative sampling variance, σ_{GEOL}^2 – relative variance of errors to geological factors

Tab. 1. Zestawienie podstawowych parametrów statystycznych zasobności jednostkowych niklu i wanadu w serii łupkowej dla opróbowania rutynowego i eksperymentalnego

Tab. 1. Statistics of nickel, vanadium accumulation index in the shale ore for routine and experimental sampling

Opróbowanie rutynowe									
Parametr	Liczba danych	Średnia	Mediana	Min Max	Odchylenie standardowe	Współ. zmienności	Współ. asymetrii	Współ. asymetrii zstandaryzowany	Współ. ekscesu zstandaryzowany
W-Cu-I [kg/m ²]*	8976	66	57	0,1 331	46	71%	1,09	42,01	30,8
W-Ni-I [g/m ²]	1022	183	165	0 919	130	71%	1,18	15,39	18,56
W-Ni-I* [g/m ²]	1020	184	165	1 919	130	71%	1,18	15,43	18,63
W-Ni-I** [g/m ²]	1018	181	165	0 731	123	68%	0,80	10,43	4,40
W-V-I [g/m ²]	960	789	686	0 3738	605	77%	0,98	12,43	7,26
W-V-I* [g/m ²]	958	791	691	2 3738	605	76%	0,98	12,43	7,28
W-V-I** [g/m ²]	959	786	685	0 3400	598	76%	0,91	11,50	4,77
Opróbowanie eksperymentalne									
W-Cu-I [kg/m ²]	34	24	18	2 61	17	73%	0,49	1,16	-1,26
W-Ni-I [g/m ²]	34	192	204	20 480	135	70%	0,36	0,85	-1,18
W-V-I [g/m ²]	34	571	392	48 1712	477	83%	0,69	1,63	-0,74

Objaśnienia: * - bez uwzględnienia wartości zerowych, ** - bez wartości anomalnych, *w przypadku gdy współczynniki asymetrii i ekscesu są na wartość bezwzględna <2 rozkład empiryczny można traktować w praktyce jako normalny

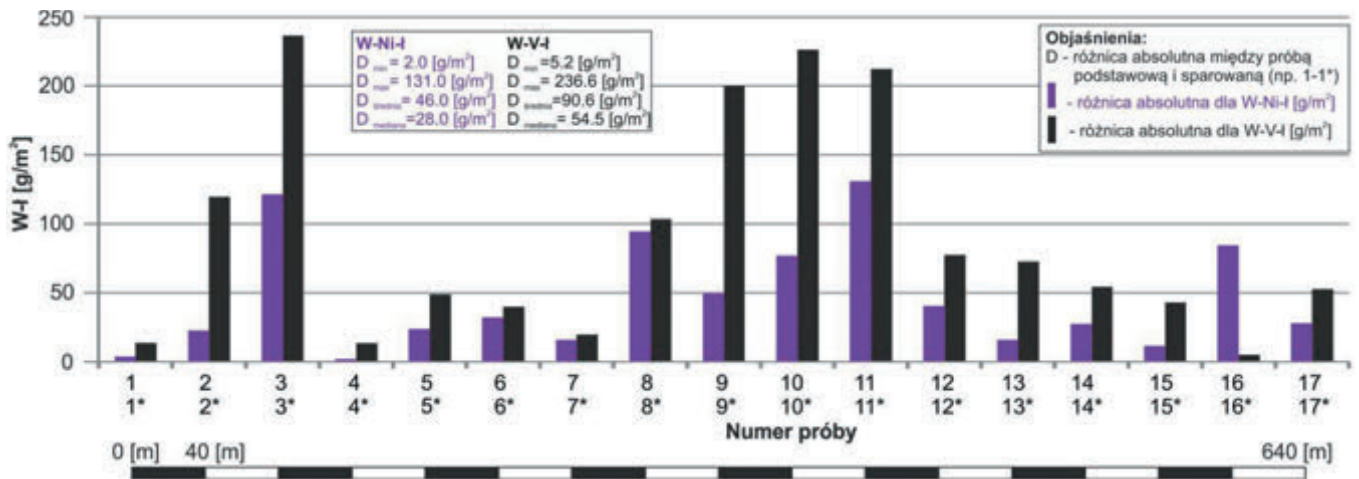
Explanation: * - for values > 0, ** - without anomalous values, *where the coefficients of skewness and kurtosis have absolute values <2 empirical distribution can be treated as normal

Tab. 2. Wyniki testów dla danych sparowanych zasobności niklu (W-Ni-I) i wanadu (W-V-I) dla opróbowania eksperymentalnego

Tab. 2. Test results for paired data of nickel (W-Ni-I) and vanadium (W-V-I) accumulation index for the experimental sampling

Pierwiastek	Rodzaj testu	P-Value*
Ni	t-Studenta (t-test)	0,96
	test rangowanych znaków (signed rank test)	0,98
V	t-Studenta (t-test)	0,79
	test rangowanych znaków (signed rank test)	0,57

* P-Value - najostrejszy poziom istotności, przy którym można odrzucić testowaną hipotezę



Rys. 3. Zestawienie różnic absolutnych zasobności niklu (W-Ni-I) i wanadu (W-V-I) dla prób podstawowych i prób sparowanych dla wyników opróbowania eksperymentalnego

Fig. 3. Comparison of absolute difference of nickel (W-Ni-I) and vanadium (W-V-I) accumulation index for base samples and duplicate samples for experimental sampling

Tab. 3. Modele liniowe zależności zasobności niklu i wanadu dla prób sparowanych (*) od zasobności niklu i wanadu dla oznaczeń prób podstawowych oraz wyniki testowania parametrów modeli liniowych

Tab. 3. Linear models of dependence of accumulation index in paired samples and base samples for nickel and vanadium and the results of testing of linear models parameters

Rodzaj modelu	Nikiel	Wanad
Model liniowy	$R^2=81\%$	$R^2=94\%$
	$W-Ni-I^* = 32,02 + 0,83 \cdot W-Ni-I$	$W-V-I^* = 40,80 + 0,94 \cdot W-V-I$
	$P(b_0=0)=0,215(+)$ $P(b_1=1)=0,062(+)$	$P(b_0=0)=0,393(+)$ $P(b_1=1)=0,187(+)$

Objaśnienia: * P- najostrejszy poziom istotności, przy którym można odrzucić testowaną hipotezę, że wyraz wolny ($b_0=0$) i współczynnik kierunkowy ($b_1=1$)

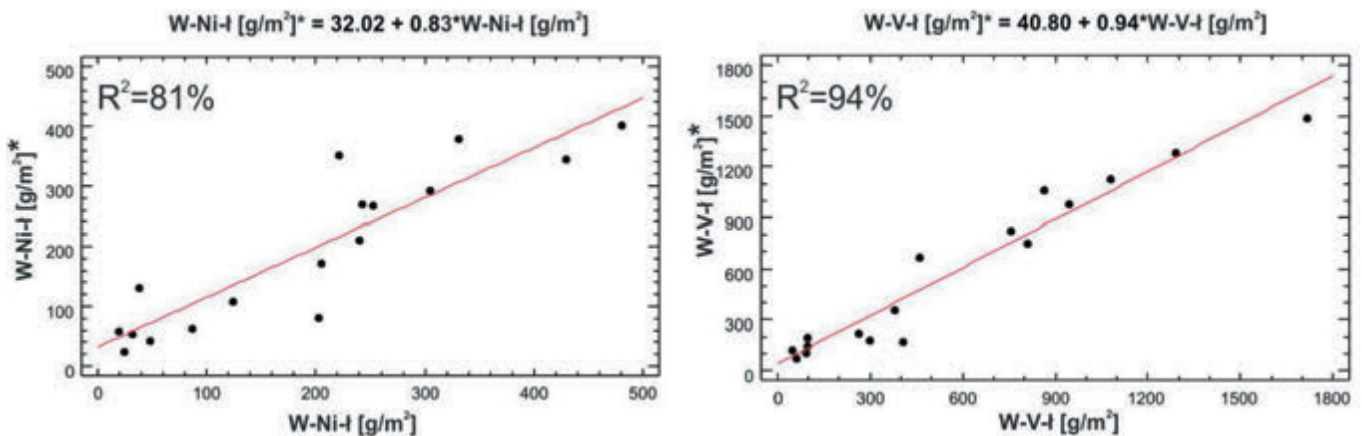
(+) - brak podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej dla poziomu istotności $\alpha=0.05$ (test t-Studenta)
Testowanie współczynnika kierunkowego. Hipoteza zerowa: współczynnik kierunkowy równy jeden. Jednostronna hipoteza alternatywna w populacji generalnej współczynnik kierunkowy jest mniejszy od jedności.

Sugeruje to, że zmienność naturalna ma dominujący wpływ na zmienność lokalną, a błędy opróbowania nie odgrywają znaczącej roli.

W artykule podjęto również próbę obliczenia wkładu poszczególnych elementów kształtujących wielkość wariacji zmienności lokalnej parametru kierując się wytycznymi podanymi przez Abzalova [1]. Analiza ta pokazała znacznie wyższy wpływ naturalnej zmienności zasobności niklu i wanadu niż błędów opróbowania na wielkość zmienności lokalnej (tab. 5).

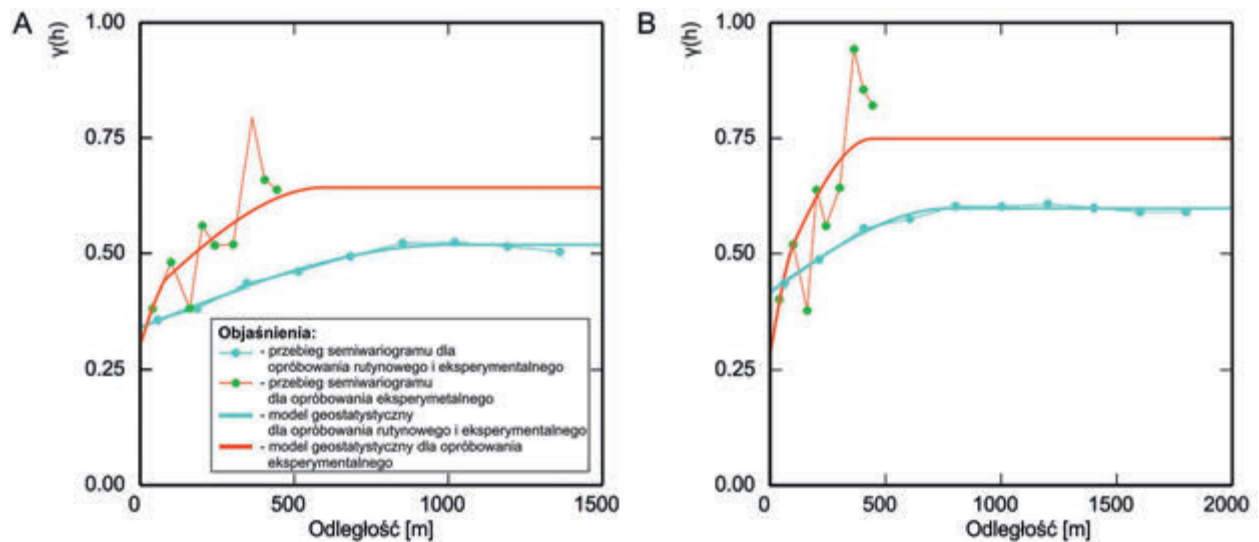
Procentowy udział wariacji wywołanej czynnikami naturalnymi (geologicznymi) w całkowitej wariacji zmienności lokalnej wynosi dla zasobności niklu 63% a dla zasobności wanadu 72%.

Wobec dominacji zmienności naturalnej (geologicznej) nawet podwyższenie dokładności procedury opróbowania nie spowoduje znaczącego obniżenia wariacji zmienności lokalnej (C_0), a w konsekwencji obniżenia błędów oszacowań średnich zasobności i zasobów Ni i V.



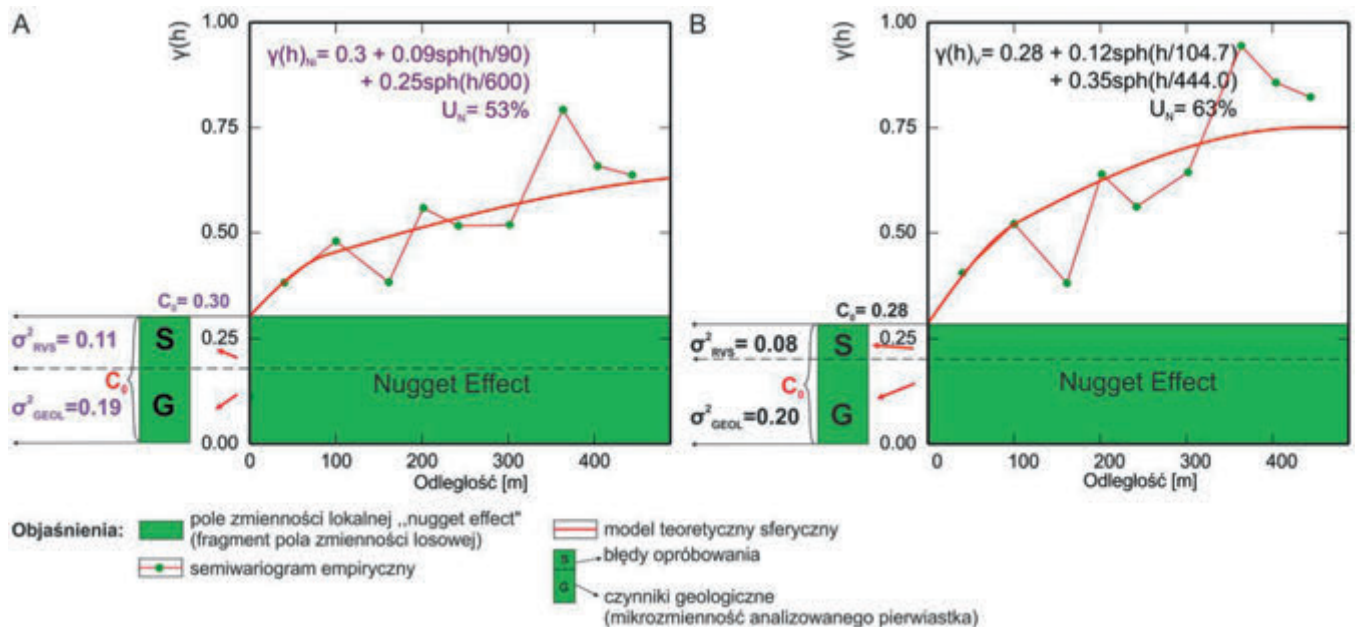
Objaśnienia: *próby sparowane

Rys. 4. Modele liniowe zależności zasobności niklu i wanadu dla prób sparowanych (*) od zasobności niklu i wanadu dla oznaczeń prób podstawowych.
Fig. 4. Linear models of dependence of accumulation index in paired samples (*) and base samples for nickel and vanadium.



Rys. 5. Semiwariogramy relatywne „pairwise” oraz dopasowane do nich modele geostatystyczne dla zasobności jednostkowej niklu (A) i wanadu (B) dla opróbowania eksperymentalnego oraz rutynowego dla serii łupkowej

Fig. 5. The “pairwise” relative semivariogram with geostatistical models for of nickel (W-Ni-I) and vanadium (W-V-I) abundance for experimental sampling and routine sampling for the shale ore



Rys. 6. Semiwariogramy relatywne „pairwise” oraz dopasowane do nich modele geostatystyczne dla zasobności jednostkowej niklu (A) i wanadu (B) dla opróbowania eksperymentalnego serii łupkowej

Fig. 6. The “pairwise” relative semivariogram with geostatistical models for of nickel (W-Ni-I) and vanadium (W-V-I) abundance for experimental sampling

Podsumowanie i wnioski

Zmienność lokalna zasobności Ni i V jest determinowana przez zmienność naturalną wynikającą z rozmieszczenia (formy występowania) obu pierwiastków. Wpływ błędów opróbowania na zmienność lokalną jest drugorzędny. Nieznacznie większa zmienność lokalna niklu w porównaniu ze zmiennością lokalną wanadu może być tłumaczona ich różną formą występowania. W złożu rud Cu-Ag LGOM nikiel występuje w postaci minerałów własnych oraz w formie domieszek izomorficznych w innych minerałach, głównie w pirycie oraz w mniejszej ilości w chalkozynie i bornicie. Wanad jest charakterystycznym metalem towarzyszącym złożu miedzi w łupkach miedzionośnych, natomiast nie tworzy minerałów własnych. Główne koncentracje tego pierwiastka związane są z substancją organiczną.

Brak znaczącego wpływu błędów opróbowania na zmienność lokalną sugeruje, że podwyższenie jakości procesu opróbo-

wania nie spowoduje znaczącego obniżenia błędów oszacowania zasobów obu pierwiastków w blokach eksploatacyjnych.

Z teoretycznego punktu widzenia wariację zmienności lokalnej zasobności Ni i V a zarazem podwyższenie dokładności szacowania ich zasobów można obniżyć zwiększając masę (objętość) pobieranych prób, ale wydaje się to w praktyce nieracjonalne ze względu na wzrost kosztów procesu opróbowania i małe znaczenie ekonomiczne rozpatrywanych pierwiastków towarzyszących.

Geostatystyczny opis struktury zróżnicowania zasobności Ni i V jest trudny z uwagi na ich dużą zmienność oraz duży rozstaw prób, w których oznaczane są ich zawartości.

Wyniki przedstawionych badań można tylko odnieść do obszaru objętego wykonanym dla ich potrzeb opróbowaniem eksperymentalnym. Definitywne rozwiązanie zagadnienia zmienności lokalnej oraz potwierdzenie otrzymanych wyników wymaga poszerzenia zakresu opróbowania eksperymentalnego przez jego powtórzenie w innych częściach złoża.

Podziękowania: Autorka składa wyrazy wdzięczności i podziękowania Panu dr. Wojciechowi Kaczmarkowi za pomoc w realizacji badań i cenne dyskusje.

Praca zrealizowana została w ramach grantu dziekańskiego (nr 15.11.140.625) w roku 2017.

Literatura

- [1] Abzalov M., *Geostatistical approach to the estimation of sampling precision*, 2011, 5th World Conference on Sampling and Blending, Chile (materiały konferencyjne)
- [2] Abzalov M., *Sampling Errors and Control of Assay Data Quality in Exploration and Mining Geology*, 2011, Applications and Experiences of Quality Control, Prof. Ognyan Ivanov (Ed.), ISBN: 978-953-307-236-4
- [3] Armstrong M., *Basic Linear Geostatistics: Springer-Verlag*, Berlin Heidelberg New York, 1998, s. 27-28, 36, 50, 52, 65-67, 70-71, 101, 108-109, 117, ISSN 3-540-61845-7
- [4] Auguścik J., Mucha J., Wasilewska-Błaszczuk M., *Badanie struktury zmienności zasobności pierwiastków towarzyszących (As, Co, Pb) w złożu Cu-Ag LGOM (Kopalnia Rudna): konieczne, przydatne czy zbędne?*, 2016, *Górnictwo Odkrywkowe*, R. 57 nr 3, s. 36–43 ISSN 0043-2075
- [5] Carrasco P.C., *Nugget effect, artificial or natural?*, 2010, *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 110, s. 299-305, ISSN 2225-6253
- [6] Chang, Y.H., Scrimshaw, M.D., Emmerson, R.H.C. and Lester, J.N., *Geostatistical analysis of sampling uncertainty at the Tollesbury Managed Retreat site in Blackwater Estuary*, Essex, UK: Kriging and cokriging approach to minimize sampling density, 1998 *The Science of the Total Environment* (221) s. 43-57, ISSN 0048-9697
- [7] Clark I., *Statistics or geostatistics? Sampling error or nugget effect?*, 2010, *JSAMM.*, 110(6), 307-312, SA ISSN 038-223X/3.00+0.00
- [8] David M. *Geostatistical ore reserve estimation*. Elsevier Science Ltd, *Developments in Geomathematics*, 1977, vol. 2, s. 384, eBook ISBN: 9780444597618
- [9] Deutsch C.V., Journel A.G., *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*, 1992, Oxford University Press, New York
- [10] Greń J., *Modele i zadania statystyki matematycznej*, 1968, Warszawa Państwowe Wydawnictwo Naukowe, s. 153-154
- [11] ISATIS, Bleinès C., Bourges M., Deraisme J., Geffroy F., Jeannée N., Lemarchand O., Perseval S., Rambert F., Renard D., Touffait Y., Wagner L., *Isatis Technical Refences*, *Geovariances*, 2016
- [12] Kijewski P. i Jarosz J. *Mineralizacja kruszcowa i formy występowania pierwiastków towarzyszących w złożu rudy miedzi, 1987, [W:] Metale towarzyszące w złożu rud miedzi, stań badań i perspektywy dalszego wykorzystania*. Konferencja Nauk.- Tech. w Rydzynie, Kom. ds. Pol. Surowcowej NOT, Wrocław, s. 21 – 47
- [13] Kokesz Z., Mucha J., *Zasady doboru wariogramu przy obliczaniu wielkości błędów ekstensji*, 1983, *Przegląd Geologiczny* 2, Warszawa, s. 83–90, ISSN
- [14] Kokesz Z., *Trudności i ograniczenia w geostatystycznym modelowaniu zmienności złóż i szacowaniu zasobów metodą krigingu*, 2006, *Gospodarka surowcami mineralnymi*, 22(3), s. 5-20, ISSN 0860-0953
- [15] Matheron G., *Principles of geostatistics*, *Economic Geology*, 1963, vol. 58, s. 1246-66
- [16] Matheron G., *Traité de géostatistique appliquée*, 1962-1963 T. 1 (1962), s. 334, T. 2 (1963), Editions Technip., Paris, s. 172
- [17] Mucha J., *Zmienność lokalna rud Zn-Pb w złożu „Pomorzany”*, 1988, *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, t. 4, z. 4, s. 877-891 ISSN 0860-0953.
- [18] Mucha J., *Bariery i ograniczenia geostatystycznej oceny parametrów złożowych*, 2001, *Kwart. Geologia*, tom 27, z. 2-4, AGH, Kraków, s. 641-658, ISSN 0138-0974
- [19] Mucha J., Mucha J., *Struktura zmienności zawartości Zn i Pb w śląsko-krakowskich złożach rud Zn-Pb*; 2002, *Studia, Rozprawy, Monografie* nr 108, IGSMiE PAN, Kraków, s. 89-120, ISSN 0860-74-19
- [20] Mucha J., Wasilewska M., *Ocena błędów opróbowania złóż – statystyczny niezbędnik geologa górniczego*, 2009, *Górnictwo Odkrywkowe*, nr 2-3, s. 84-90, ISSN 0043-2075
- [21] Namysłowska-Wilczyńska B., *Zmienność złóż rud miedzi na monoklinie przedsudeckiej w świetle badań geostatystycznych*, 1993, *Prace Naukowe Instytutu Geotechniki i Hydrotechniki Politechniki Wrocławskiej*, seria: Monografie, nr 21, s. 179-190, ISSN 0084-2834
- [22] Nieć M. (Red), Mucha J., Bromowicz J., Wasilewska-Błaszczuk M., *Metodyka dokumentowania złóż kopalni stałych*, 2012, tom 3, *Opróbowanie złóż*, Kraków, 79, ISBN 978-83-62922-12-3
- [23] Pitard F.F., *Exploration of the “Nugget Effect”*, 1994, R. Dimitrakopoulos (ed.), *Geostatistics for the Next Century*, s.124-136, ISBN 978-94-010-4354-0
- [24] Ramsey M.H, Argyraki A., *Estimation of measurement uncertainty from field sampling: implications for the classification of contaminated land*, 1997, *The Science the Total Environ* (198), s. 243-257, ISSN 0048-9697
- [25] Sinclair A. J., Blackwell G. H., *Applied Mineral Inventory Estimation*, 2002, Cambridge University Press, s. 97-103, ISBN 0-521-79103-0

- [26] Sokołowski A., *O niewłaściwym stosowaniu metod statystycznych*, 2004, Materiały szkoleniowe, StatSoft Polska, 5-14
- [27] Tercan A.E., Dowd P.A. *The effect of the nugget variance of the grade variogram on the estimation of conditional distributions by indicator and probability kriging*, 1993, Leeds University Mining Association Journal (LUMA), 11, 173-181, ISBN 0951141961
- [28] Witkowska-Kita B. 2015: *Surowce krytyczne i strategiczne w Polsce*. Monografia, Warszawa, ISBN 978-83-86040-22-3



Fot. Jacek Koźma

Krajobraz antropogeniczny. Brzeg zbiornika kwaśnych wód pokopalnianych wypełniającego odkrywkowe wyrobisko węgla brunatnego dawnej kopalni „Przyjaźń Narodów - Szyb Babina”, w rejonie Łęknicy