

# Zastosowanie metod statystycznych do określenia związków pomiędzy minerałami a pierwiastkami jako wprowadzenie do analizy chemostratygraficznej

## Application of statistical methods to determine mineral-element links as an introduction to chemostratigraphic analysis

Anna Przelaskowska, Urszula Zagórska

*Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

**STRESZCZENIE:** Chemostratygrafia to technika korelacji oparta na danych geochemii nieorganicznej. Polega na dobraniu odpowiednich wskaźników korelacyjnych (pierwiastków / stosunków pierwiastków) pozwalających na wyodrębnienie charakterystycznych poziomów chemostratygraficznych w profilu otworu. Dla prawidłowego doboru wskaźników chemostratygraficznych niezbędne jest ustalenie związków między minerałami a pierwiastkami, ponieważ wiele pierwiastków może wchodzić w skład różnych minerałów. Celem pracy było zastosowanie analizy statystycznej do scharakteryzowania związków między minerałami a pierwiastkami dla próbek piaskowców czerwonego spągowca. W pracy wykorzystano takie metody jak: analiza korelacyjna oparta na interpretacji macierzy korelacji (CC) i wykresach korelacyjnych oraz analiza głównych składowych (PCA). PCA służy do redukcji liczby zmiennych opisujących zjawiska oraz do odkrycia prawidłowości między zmiennymi. Uzyskane wyniki pozwoliły na wyróżnienie kilku grup pierwiastków wzajemnie ze sobą powiązanych, kumulujących się w podobnych minerałach. Wyodrębniono szereg grup związanych z różnymi minerałami, między innymi z minerałami ciężkimi, minerałami ilastymi i dodatkami z płuczki. Pierwiastki ziem rzadkich (REE) rozdzieliły się na dwie grupy: lekkie ziemie rzadkie (LREE) i ciężkie ziemie rzadkie (HREE), co świadczy o tym, że mogą być związane z nieco innymi asocjacjami minerałów ciężkich. Analiza korelacyjna potwierdziła wnioski uzyskane na podstawie analizy PCA, jak również pozwoliła na uszczegółowienie niektórych zależności. Podsumowując, w ramach pracy scharakteryzowano związki pomiędzy pierwiastkami a minerałami w profilu otworu Pł 3. Zaprezentowano właściwy sposób analizy danych geochemicznych, który jest podstawą budowania podziału chemostratygraficznego.

**Słowa kluczowe:** chemostratygrafia, pierwiastki ziem rzadkich, analiza korelacyjna, analiza głównych składowych.

**ABSTRACT:** Chemostratigraphy is a correlation technique based on inorganic geochemistry data. It involves the selection of appropriate correlation indices (elements/element ratios) that allow to determine characteristic chemozones in the borehole profile. Determination of element-mineral links is necessary for the correct selection of chemostratigraphic indices, as many elements can be part of different minerals. The purpose of this study was to apply statistical analysis to characterize the relationships between minerals and elements for Rotliegend sandstone samples. The following methods were used in the study: correlation analysis based on interpretation of correlation matrix (CC), correlation plots and principal component analysis (PCA). Principal component analysis (PCA) is used to reduce the number of variables describing phenomena and to discover regularities between them. The results made it possible to distinguish several groups of elements related to each other, accumulating in similar minerals. A number of groups associated with various minerals were distinguished, including, among others, heavy minerals, clay minerals and mud additives. Rare earth elements (REEs) separated into two groups: light rare earths (LREE) and heavy rare earths (HREE), indicating that they may be associated with slightly different heavy mineral associations. The correlation analysis confirmed the conclusions obtained from the PCA analysis and allowed for a more detailed analysis of some relationships. In conclusion, the paper characterizes the relationships between elements and minerals in the profile of the Pł 3 borehole. The correct method of analysing geochemical data, which is the basis for building a chemostratigraphic division, was presented.

**Key words:** chemostratigraphy, rare earth elements, correlation analysis, principal component analysis.

## Wstęp

Chemostratygrafia to technika korelacji oparta na danych geochemii nieorganicznej. Dzięki udoskonaleniu metod analitycznych stała się w ciągu ostatnich 20 lat bardzo popularna jako narzędzie korelacji w poszukiwaniach złóż węglodorów i innych badaniach geologicznych (Craigie, 2018). Olbrzymią zaletą chemostratygrafii jest to, że nie wymaga dużej ilości próbek, można ją stosować na rdzeniach, ale także na – z reguły dużo bardziej dostępnych – próbkach okruchowych. Wykorzystanie technologii atomowej spektrometrii emisyjnej i masowej ze wzbudzeniem w plazmie indukowanej (ICP-OES/MS) i fluorescencji rentgenowskiej (XRF) umożliwia uzyskanie dobrej jakości danych dla 40 do 50 pierwiastków w zakresie Na-U.

Nowoczesne spektrometry XRF pozwalają na pomiar wielkości pierwiastków w stężeniach 1 ppm lub mniejszych, a technika ICP-OES/MS oferuje jeszcze lepsze poziomy detekcji, z wykrywalnością niektórych pierwiastków śladowych i REE (pierwiastki ziem rzadkich) na poziomie 1 ppb. Dzięki temu możliwe jest konstruowanie podziałów chemostratygraficznych opartych na bardzo subtelnych zmianach występowania minerałów ciężkich i innych minerałów akcesorycznych, których zawartości w całej skale nie przekraczają 0,1–2% (Craigie, 2018).

Pierwsze prace z dziedziny chemostratygrafii powstawały w latach 80. i 90. ubiegłego wieku i dotyczyły między innymi skał wulkanicznych (Kishida i Riccio, 1980), osadowych skał proterozoicznych (Zhengyong et al., 1985), czwartorzędowych piaskowców turbidytowych (Pearce i Jarvis, 1992), a także skał metamorficznych (MacLean i Barrett, 1993). W XXI wieku dziedzina ta bardzo się rozwinęła, powstały zarówno artykuły opisujące poszczególne case studies, np. chemostratygrafię fluwialnych piaskowców triasowych (Ratcliffe et al., 2006) czy różnowiekowych piaskowców i mułowców pochodzenia fluwialnego, deltowego i płytkomorskiego (Craigie et al., 2016), jak i opracowania zbiorcze, podsumowujące dotychczasowe osiągnięcia (Ramkumar, 2015; Craigie, 2018; Balaram et al., 2023). W wielu publikacjach wykorzystywano metody analizy statystycznej (analiza PCA i analiza korelacyjna) do ustalenia związków między pierwiastkami a minerałami (Ratcliffe et al., 2006; Craigie et al., 2016; Craigie i Scheibe, 2023). Garcia et al. (2023) zebrali informacje dotyczące najnowszych osiągnięć w zastosowaniu metod statystycznych, w tym sieci neuronowych, w chemostratygrafii.

Ustalenie związków między minerałami a pierwiastkami stanowi istotny element analizy danych geochemicznych. Wiele pierwiastków wchodzi w skład różnych minerałów. Przykładowo potas występuje w skaleni potasowym oraz w minerałach grupy mik (illit i muskowit), a uran – w substancji

organicznej i w różnych minerałach ciężkich, np. monacycie i cyrkonie.

W analizach chemostratygraficznych śledzi się zmiany proveniencji głównie na podstawie zmienności w udziale minerałów ciężkich (Weltje i von Eynatten, 2004). Jest to związane z ich odpornością na procesy transportu, diagenety i wietrzenia. Dzięki temu we frakcji minerałów ciężkich „zapisywana” jest informacja o rodzaju skały źródłowej (Basu, 2003). Brak dostatecznej wiedzy na temat powinowactwa pierwiastków z minerałami może prowadzić do błędnej interpretacji profili zmienności poszczególnych pierwiastków. Dlatego też przed rozpoczęciem konstrukcji schematów chemostratygraficznych należy dokładnie przeanalizować związki pomiędzy minerałami a pierwiastkami w badanym materiale. Analizę tę można przeprowadzić poprzez analizę statystyczną danych geochemicznych oraz porównanie danych geochemicznych z wynikami innych badań.

Celem pracy było zastosowanie analizy statystycznej do scharakteryzowania związków między minerałami i pierwiastkami wykorzystywanymi w chemostratygrafii.

## Metodyka

W statystycznej analizie danych geochemicznych najczęściej wykorzystywane są następujące metody: analiza korelacyjna oparta na interpretacji macierzy korelacji (CC) i wykresach korelacyjnych oraz analiza głównych składowych (PCA).

## Analiza korelacyjna

Zastosowanie analizy korelacyjnej pozwala na określenie związków pomiędzy przebadanymi pierwiastkami. W pracy przyjęto, że współczynniki korelacji o wartości powyżej 0,7 świadczą o występowaniu istotnego związku (Craigie, 2018). W przypadku niektórych pierwiastków, np. takich jak Zr i Hf, możemy z góry oczekiwać wysokich współczynników korelacji, ponieważ pierwiastki te koncentrują się w tych samych minerałach (cyrkonach). Należy jednak pamiętać o tym, że wysoki współczynnik korelacji może świadczyć nie tylko o związku danych pierwiastków z tym samym minerałem, ale też o zawartości w tej samej frakcji ziarnowej. Przykładowo dobre korelacje między Al a K mogą być związane z tym, że oba pierwiastki występują we frakcji ilastej, przy czym Al koncentruje się głównie w kaolinicie, a K – w illicie. Innym problemem, z którym można się spotkać przy korzystaniu ze stosunkowo niewielkich zbiorów danych (poniżej 60 próbek), jest tak zwany efekt jednej próbki. Polega to na tym, że pojedyncze próbki o anomalnie niskich lub wysokich zawartościach

danego pierwiastka mogą wpłynąć na wartości współczynnika korelacji. Dlatego też analizę korelacyjną należy stosować w połączeniu z innymi technikami statystycznymi.

Przedstawienie danych na wykresach korelacyjnych umożliwia bardziej wnikliwą analizę danych. Na wykresach można czasem wyróżnić grupy próbek, dla których występują różne trendy, dla części próbek trend pozytywny, a dla części – negatywny lub brak korelacji, co może być związane ze zmiennością litologiczną badanych skał.

Analiza składowych głównych (PCA) służy do redukcji liczby zmiennych opisujących zjawiska oraz do odkrycia prawidłowości między zmiennymi (Okoń, 1964; Jolliffe, 2002; Smith, 2002). Polega ona na wyznaczeniu składowych będących kombinacją liniową badanych zmiennych. Każda składowa główna wyjaśnia pewną część zmienności danych początkowych. Kolejne składowe są definiowane tak, aby maksymalizować zmienność, która nie została wyjaśniona przez poprzednią składową. W PCA zakłada się, że im większa rozpiętość danych (czyli wariancja), tym lepsza zmienna (cecha), bo niesie w sobie więcej informacji. Wyniki głównych składowych dla wektorów własnych (*eigenvectors*), wskazują na wzajemne powiązania pomiędzy badanymi pierwiastkami oraz ich związki ze składem mineralnym. Im bliżej obok siebie układają się poszczególne zmienne (pierwiastki), tym bliższe są związki pomiędzy nimi. Opisana technika była wykorzystywana w wielu pracach z dziedziny chemostratygrafii (Eisenberg i Harris, 1995; Craigie, 2015; Craigie i Rees, 2016).

Aby uzyskać poprawne wyniki analizy PCA, dobrze jest dysponować większą liczbą obserwacji (analiz) niż zmiennych (pierwiastków). Wykorzystany w pracy zestaw danych geochemicznych zawiera 60 analiz 38 pierwiastków. Dla zebranych danych geochemicznych (tj. szczegółowych analiz składu chemicznego skał czerwonego spągowca) przeprowadzono szereg analiz statystycznych i porównawczych. Analizy te pokazują związki pierwiastków ze składem mineralnym, tj. występowaniem pierwiastków w konkretnych minerałach i/lub asocjacjach minerałów. Trudnością w przedstawieniu tych relacji jest to, że większość pierwiastków jest powiązana z kilkoma lub nawet wieloma minerałami. Z tego powodu analizę zależności pomiędzy składem geochemicznym a mineralnym należy przeprowadzać indywidualnie dla każdego zbioru danych geochemicznych. Wydzielono między innymi grupy pierwiastków związane z minerałami ciężkimi.

### Materiał badawczy

W pracy wykorzystano wyniki badań składu chemicznego 60 próbek okruchowych z otworu P1 3. Szczegółową analizę składu chemicznego z uwzględnieniem pierwiastków ziem

rzadkich wykonano w laboratorium Actlabs w Kanadzie na próbkach stapianych z boranem litu z zastosowaniem metod ICP-OES i ICP-MS. Pomocniczo wykorzystano wyniki badań składu mineralnego wykonanych na próbkach rdzeni z głębokości odpowiadających położeniu badanych zwiercin. Analizę składu mineralnego przeprowadzono metodą ilościowej analizy rentgenowskiej opartej na technice Rietvelde (Kowalska, 2013) za pomocą dyfraktometru rentgenowskiego X'Pert Pro firmy Panalytical.

Ze względu na zbieżność głębokości poboru rdzeni i próbek okruchowych można było przyjąć, że skład mineralny rdzeni odpowiada mniej więcej składowi mineralnemu analizowanych zwiercin. Przebadane rdzenie to piaskowce zawierające średnio 69% kwarcu, 4,5% dolomitu i 1,7% hematytu. Skały w górnej części profilu zawierają tylko skalenie potasowe (średnio 7,5%) i nieco więcej minerałów ilastych (średnio 15%). Próbki z dolnej części profilu zawierają zarówno skalenie potasowe (średnio 8,8%), jak i plagioklasy (średnio 5,1%) oraz nieco mniej ilów (średnio 11%). W skałach tych nie stwierdzono kalcytu.

## Wyniki

### Analiza głównych składowych (PCA)

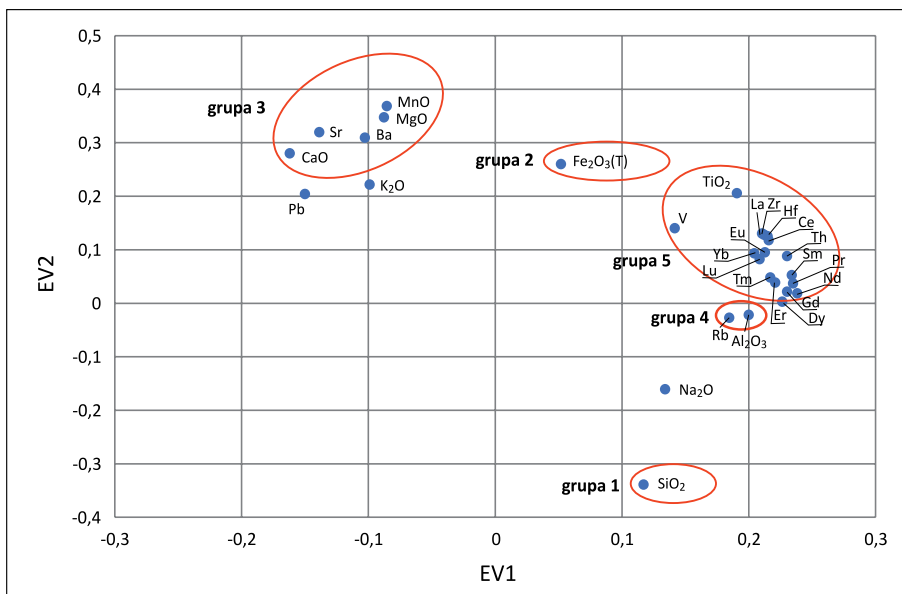
Jak wspomniano powyżej, analiza głównych składowych PCA polega na wyznaczeniu składowych będących kombinacją liniową badanych zmiennych. Wyniki głównych składowych dla wektorów własnych (*eigenvectors*) wskazują na wzajemne powiązania pomiędzy badanymi pierwiastkami oraz ich związki ze składem mineralnym (pierwiastki łączą się w poszczególnych grupach, rysunki 1–3). Trzeba jednak nadmienić, że nie wszystkie pierwiastki wykazują takie jednoznaczne powiązania, a wtedy nie wchodzi w skład żadnej z wyróżnionych grup. Wektory własne EV1 i EV2 stanowią najważniejsze źródła zmienności w badanym zestawie danych i razem odpowiadają za 79% zmienności, przy czym EV1 odpowiada za 58% zmienności, a EV2 za 21%.

Na wykresie EV1 vs EV2 (rysunek 1) można zaobserwować szereg ogólnych związków między pierwiastkami:

Grupa 1: zawiera Si, charakteryzuje się dodatnimi wartościami EV1 i ujemnymi EV2. Pierwiastek ten związany jest z kwarcem.

Grupa 2: zawiera Fe, charakteryzuje się dodatnimi wartościami EV1 i EV2. Fe związane jest z hematytem.

Grupa 3: zawiera Ba, Sr, Ca oraz Mg i Mn, charakteryzuje się ujemnymi wartościami EV1 oraz dodatnimi wartościami EV2. Ba i Sr są związane z dodatkami z płuczki, Mg, Mn – z dolomitem, natomiast Ca – zarówno z dolomitem, jak i z dodatkami płuczkowymi.



**Rysunek 1.** Wykres wektorów własnych EV1 i EV2

**Figure 1.** Plot of the eigenvectors EV1 and EV2

Grupa 4: zawiera Al i Rb, charakteryzuje się dodatnimi wartościami EV1 i zerowymi wartościami EV2. Pierwiastki te związane są z minerałami ilastymi. Rb podstawia potas w strukturach mik i illitu (Craigie, 2018), stąd jego występowanie w minerałach ilastych. K nie jest obecne w wydzielonej grupie prawdopodobnie dlatego, że występuje również w skałeniu potasowym.

Grupa 5: zawiera Th, Zr, Hf, pierwiastki ziem rzadkich oraz, nieco oddalone, Ti i V. Charakteryzuje się dodatnimi wartościami EV1 oraz EV2. Pierwiastki tej grupy związane są z minerałami ciężkimi.

Na wykresie EV1 vs EV3 (rysunek 2) można wyróżnić szereg następujących związków między pierwiastkami:

Grupa 1: zawiera Si, charakteryzuje się dodatnimi wartościami EV1 i lekko ujemnymi wartościami EV3. Pierwiastek ten związany jest z kwarcem.

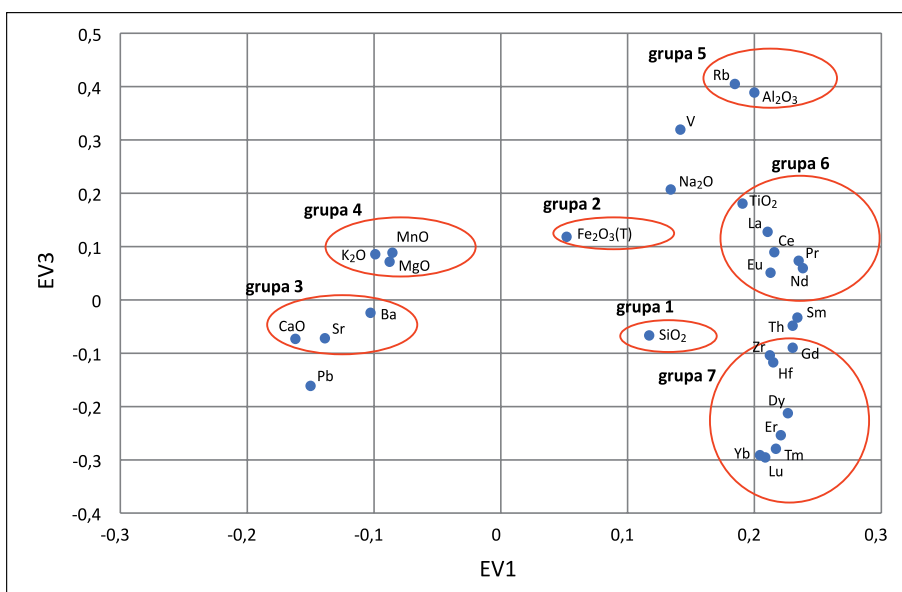
Grupa 2: zawiera Fe, charakteryzuje się dodatnimi wartościami EV1 i EV3. Fe związane jest z hematytem.

Grupa 3: zawiera Ba, Sr i Ca, charakteryzuje się ujemnymi wartościami EV1 oraz lekko ujemnymi wartościami EV3. Pierwiastki te związane są z dodatkami z płuczki.

Grupa 4: zawiera Mg, Mn i K, charakteryzuje się ujemnymi wartościami EV1 oraz dodatnimi wartościami EV3. Mg i Mn można powiązać z dolomit. Przyczyna występowania K w tej grupie nie jest jasna, na pozostałych wykresach wektorów własnych K nie łączy się z Mg i Mn.

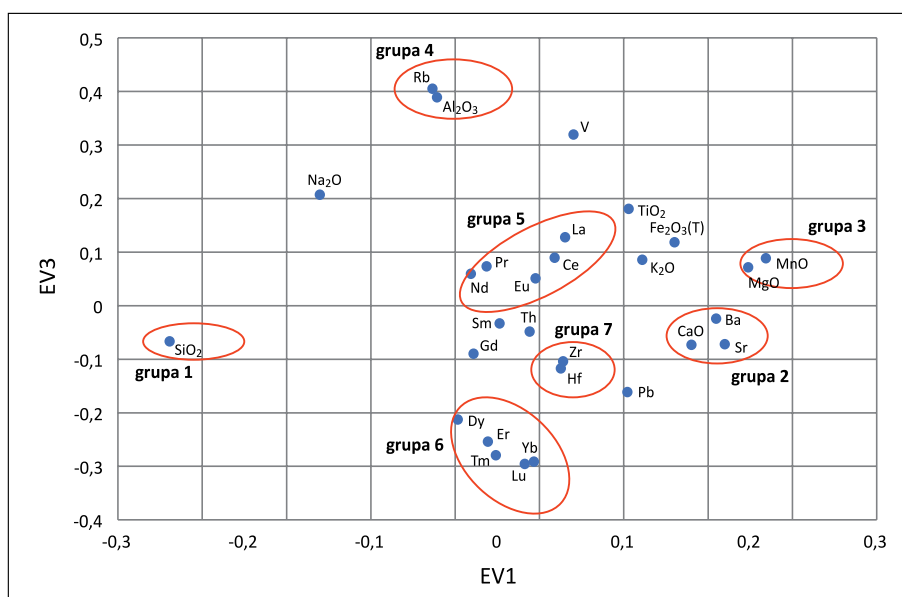
Grupa 5: zawiera Al i Rb, charakteryzuje się dodatnimi wartościami EV1 i EV3. Pierwiastki te związane są z minerałami ilastymi.

Grupa 6: zawiera LREE (lekkie ziemie rzadkie) i Ti, charakteryzuje się dodatnimi wartościami EV1 i EV3. LREE wiążą się zarówno z ilami, jak i z minerałami ciężkimi, Ti występuje w minerałach ciężkich.



**Rysunek 2.** Wykres wektorów własnych EV1 i EV3

**Figure 2.** Plot of the eigenvectors EV1 and EV3



**Rysunek 3.** Wykres wektorów własnych EV2 i EV3

**Figure 3.** Plot of the eigenvectors EV2 and EV3

Grupa 7: zawiera HREE (ciężkie ziemie rzadkie) oraz Zr i Hf, charakteryzuje się dodatnimi wartościami EV1 i ujemnymi wartościami EV3. Pierwiastki te związane są z minerałami ciężkimi.

Na wykresie EV2 vs EV3 można wyróżnić szereg następujących związków między pierwiastkami (rysunek 3):

Grupa 1: zawiera Si, charakteryzuje się ujemnymi wartościami EV2 i lekko ujemnymi wartościami EV3. Pierwiastek ten związany jest z kwarcem.

Grupa 2: zawiera Ba, Sr i Ca, charakteryzuje się dodatnimi wartościami EV2 oraz lekko ujemnymi wartościami EV3. Pierwiastki te związane są z dodatkami z płuczki.

Grupa 3: zawiera Mg i Mn, charakteryzuje się dodatnimi wartościami EV2 i EV3. Mg i Mn związane są z dolomitom.

Grupa 4: zawiera Al i Rb, charakteryzuje się lekko ujemnymi wartościami EV2 i dodatnimi wartościami EV3. Pierwiastki te związane są z minerałami ilastymi.

Grupa 5: zawiera LREE (lekkie ziemie rzadkie), charakteryzuje się dodatnimi wartościami EV2 i EV3. Pierwiastki te związane są z iltami, jak i z minerałami ciężkimi.

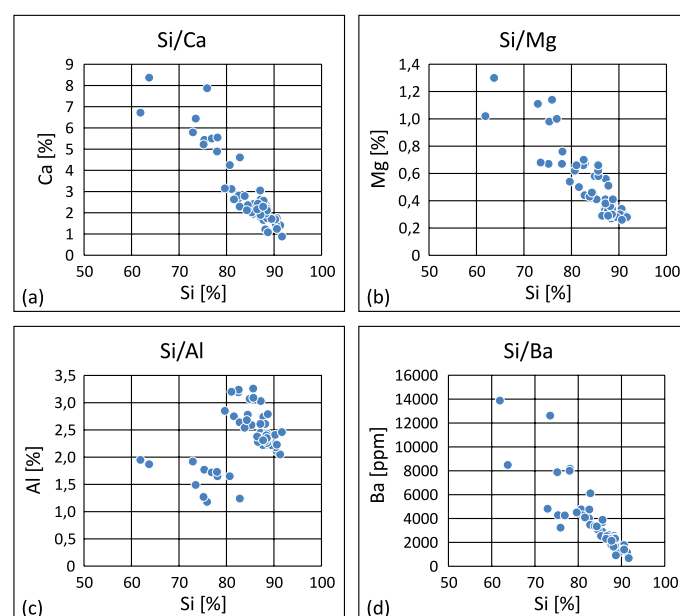
Grupa 6: zawiera HREE (ciężkie ziemie rzadkie), charakteryzuje się dodatnimi wartościami EV1 i ujemnymi wartościami EV3. Pierwiastki te związane są z różnymi minerałami ciężkimi.

Grupa 7: zawiera Zr i Hf, charakteryzuje się dodatnimi wartościami EV1 i ujemnymi wartościami EV3. Pierwiastki te występują w cyrkonie.

### Analiza korelacyjna

W ramach analizy korelacyjnej skonstruowano macierz korelacji dla 38 pierwiastków występujących w analizowanych próbkach czerwonego spągowca oraz wykresy korelacyjne dla wybranych pierwiastków. Na macierzy korelacji zaznaczają się związki pomiędzy poszczególnymi pierwiastkami głównymi

oraz śladowymi. Analizie poddano zależności charakteryzujące się współczynnikiem korelacji powyżej 0,7, za dobre korelacje uznano te o współczynniku większym od 0,8.



**Rysunek 4.** Wykresy korelacyjne Si/Ca (a), Si/Mg (b), Si/Al (c) i Si/Ba (d)

**Figure 4.** Correlation plots Si/Ca (a), Si/Mg (b), Si/Al (c), and Si/Ba (d)

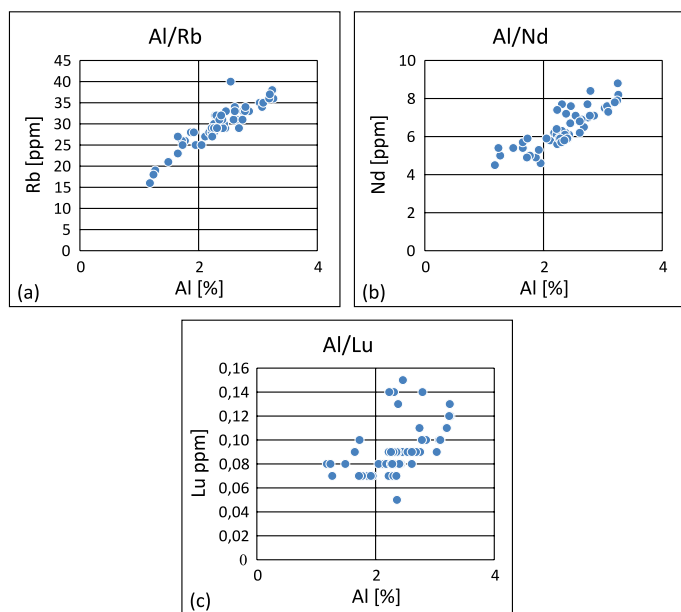
**Krzem** wykazuje ujemną korelację z Ca i Mg (tabela 1, rysunek 4a,b), co wskazuje na to, że wraz ze wzrostem ilości węglanów spada ilość kwarcu. Wyraźnie ujemna korelacja z Si widoczna jest także w przypadku Ba (tabela 1, rysunek 4d), występującego w barycie dodawanym do płuczki. Można więc stwierdzić, że dodatki z płuczki istotnie wpływają na skład mineralny badanych próbek. W przypadku korelacji Si z Al wyróżniają się dwie grupy skał (rysunek 4c). Większość próbek

Tabela 1. Macierz korelacji składu chemicznego

Table 1. Correlation matrix of the chemical composition

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (T)	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	V	Ba	Sr	Zr	Rb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Pb	Th	
SiO <sub>2</sub>	1	0,42	-0,41	-0,95	-0,89	-0,91	0,50	-0,69	-0,05	-0,06	-0,86	-0,94	0,17	0,39	0,17	0,22	0,41	0,45	0,39	0,25	0,40	0,46	0,37	0,35	0,24	0,27	0,18	-0,65	0,28	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,42	1	-0,06	-0,30	-0,33	-0,66	0,64	-0,29	0,75	0,59	-0,39	-0,58	0,61	0,92	0,79	0,79	0,83	0,85	0,77	0,74	0,71	0,60	0,54	0,51	0,45	0,48	0,62	-0,66	0,73	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (T)	-0,41	-0,06	1	0,48	0,51	0,43	-0,43	-0,08	0,24	0,39	0,23	0,44	0,08	-0,21	0,12	0,11	0,04	0,03	0,04	0,06	0,00	0,03	0,11	0,07	0,06	0,09	0,08	0,25	0,11	
MnO	-0,95	-0,30	0,48	1	0,95	0,85	-0,58	0,63	0,18	0,15	0,81	0,90	-0,05	-0,31	-0,03	-0,03	-0,26	-0,30	-0,25	-0,13	-0,31	-0,37	-0,27	-0,25	-0,15	-0,17	-0,07	0,63	-0,15	
MgO	-0,89	-0,33	0,51	0,95	1	0,87	-0,60	0,62	0,12	0,10	0,65	0,86	-0,06	-0,34	-0,01	-0,05	-0,27	-0,31	-0,27	-0,20	-0,35	-0,39	-0,28	-0,26	-0,15	-0,16	-0,08	0,59	-0,16	
CaO	-0,91	-0,66	0,43	0,85	0,87	1	-0,62	0,61	-0,24	-0,16	0,75	0,96	-0,36	-0,63	-0,38	-0,41	-0,59	-0,62	-0,56	-0,48	-0,57	-0,56	-0,46	-0,45	-0,35	-0,36	-0,37	0,74	-0,47	
Na <sub>2</sub> O	0,50	0,64	-0,43	-0,58	-0,60	-0,62	1	-0,09	0,29	0,22	-0,44	-0,44	0,37	0,70	0,35	0,35	0,48	0,51	0,48	0,40	0,51	0,46	0,37	0,37	0,33	0,32	0,37	-0,66	0,42	
K <sub>2</sub> O	-0,69	-0,29	-0,08	0,63	0,62	0,61	-0,09	1	-0,06	-0,07	0,51	0,56	-0,11	-0,10	-0,14	-0,20	-0,33	-0,36	-0,32	-0,26	-0,34	-0,39	-0,33	-0,26	-0,17	-0,22	-0,15	0,46	-0,24	
TiO <sub>2</sub>	-0,05	0,75	0,24	0,18	0,12	-0,24	0,29	-0,06	1	0,74	0,09	-0,09	0,82	0,65	0,87	0,86	0,82	0,81	0,81	0,83	0,72	0,65	0,67	0,65	0,66	0,66	0,66	0,83	-0,26	0,82
V	-0,06	0,59	0,39	0,15	0,10	-0,16	0,22	-0,07	0,74	1	0,02	-0,07	0,55	0,53	0,55	0,55	0,56	0,55	0,54	0,61	0,49	0,44	0,40	0,40	0,43	0,39	0,51	-0,25	0,54	
Ba	-0,86	-0,39	0,23	0,81	0,65	0,75	-0,44	0,51	0,09	0,02	1	0,89	-0,14	-0,38	-0,14	-0,17	-0,34	-0,38	-0,30	-0,30	-0,12	-0,36	-0,29	-0,29	-0,17	-0,22	-0,14	0,71	-0,24	
Sr	-0,94	-0,58	0,44	0,90	0,86	0,96	-0,64	0,56	-0,09	-0,07	0,89	1	-0,26	-0,58	-0,27	-0,31	-0,49	-0,53	-0,46	-0,46	-0,33	-0,48	-0,39	-0,39	-0,26	-0,29	-0,26	0,78	-0,37	
Zr	0,17	0,61	0,08	-0,05	-0,06	-0,36	0,37	-0,11	0,82	0,55	-0,14	-0,26	1	0,59	0,78	0,79	0,82	0,82	0,86	0,81	0,85	0,83	0,85	0,87	0,86	0,88	0,88	0,97	-0,42	0,88
Rb	0,39	0,92	-0,21	-0,31	-0,34	-0,63	0,70	-0,10	0,65	0,53	-0,38	-0,58	0,59	1	0,71	0,70	0,77	0,77	0,68	0,68	0,67	0,54	0,47	0,46	0,41	0,42	0,58	-0,63	0,65	
La	0,17	0,79	0,12	0,01	-0,01	-0,38	0,35	-0,14	0,87	0,55	-0,14	-0,27	0,78	0,71	1	0,99	0,94	0,91	0,87	0,81	0,78	0,73	0,74	0,72	0,72	0,72	0,81	-0,37	0,89	
Ce	0,22	0,79	0,11	-0,03	-0,05	-0,41	0,35	-0,20	0,86	0,55	-0,17	-0,31	0,79	0,70	0,99	1	0,96	0,93	0,89	0,82	0,81	0,77	0,77	0,76	0,75	0,75	0,81	-0,38	0,90	
Pr	0,41	0,83	0,04	-0,26	-0,27	-0,59	0,48	-0,33	0,82	0,56	-0,34	-0,49	0,82	0,77	0,94	0,96	1	0,98	0,93	0,86	0,89	0,86	0,83	0,81	0,78	0,78	0,84	-0,54	0,93	
Nd	0,45	0,85	0,03	-0,30	-0,31	-0,62	0,51	-0,36	0,81	0,55	-0,38	-0,53	0,82	0,77	0,91	0,93	0,98	1	0,94	0,86	0,91	0,88	0,86	0,82	0,78	0,80	0,84	-0,57	0,94	
Sm	0,39	0,77	0,04	-0,25	-0,27	-0,56	0,48	-0,32	0,81	0,54	-0,30	-0,46	0,86	0,68	0,87	0,89	0,93	0,94	1	0,86	0,90	0,90	0,87	0,87	0,83	0,85	0,89	-0,51	0,95	
Eu	0,25	0,74	0,06	-0,13	-0,20	-0,48	0,40	-0,26	0,83	0,61	-0,12	-0,33	0,81	0,68	0,81	0,82	0,86	0,86	0,86	1	0,86	0,79	0,77	0,76	0,75	0,73	0,82	-0,41	0,84	
Gd	0,40	0,71	0,00	-0,31	-0,35	-0,57	0,51	-0,34	0,72	0,49	-0,31	-0,48	0,85	0,67	0,78	0,81	0,89	0,91	0,90	0,86	1	0,94	0,90	0,90	0,84	0,86	0,84	-0,56	0,90	
Dy	0,46	0,60	0,03	-0,37	-0,39	-0,56	0,46	-0,39	0,65	0,44	-0,36	-0,49	0,83	0,54	0,73	0,77	0,86	0,88	0,90	0,79	0,94	1	0,95	0,94	0,89	0,90	0,84	-0,49	0,89	
Er	0,37	0,54	0,11	-0,27	-0,28	-0,46	0,37	-0,33	0,67	0,40	-0,29	-0,39	0,85	0,47	0,74	0,77	0,83	0,86	0,87	0,77	0,90	0,95	1	0,95	0,90	0,93	0,87	-0,40	0,89	
Tm	0,35	0,51	0,07	-0,25	-0,26	-0,45	0,37	-0,26	0,65	0,40	-0,29	-0,39	0,87	0,46	0,72	0,76	0,81	0,82	0,87	0,76	0,90	0,94	0,95	1	0,94	0,96	0,87	-0,42	0,88	
Yb	0,24	0,45	0,06	-0,15	-0,15	-0,35	0,33	-0,17	0,66	0,43	-0,17	-0,26	0,86	0,41	0,72	0,75	0,78	0,78	0,83	0,75	0,84	0,89	0,90	0,94	1	0,95	0,86	-0,35	0,85	
Lu	0,27	0,48	0,09	-0,17	-0,16	-0,36	0,32	-0,22	0,66	0,39	-0,22	-0,29	0,88	0,42	0,72	0,75	0,78	0,80	0,85	0,73	0,86	0,90	0,93	0,96	0,95	1	0,88	-0,39	0,87	
Hf	0,18	0,62	0,08	-0,07	-0,08	-0,37	0,37	-0,15	0,83	0,51	-0,14	-0,26	0,97	0,58	0,81	0,81	0,84	0,84	0,89	0,82	0,84	0,84	0,87	0,87	0,86	0,88	1	-0,42	0,91	
Pb	-0,65	-0,66	0,25	0,63	0,59	0,74	-0,66	0,46	-0,26	-0,25	0,71	0,78	-0,42	-0,63	-0,37	-0,38	-0,54	-0,57	-0,51	-0,41	-0,56	-0,49	-0,40	-0,42	-0,35	-0,39	-0,42	1	-0,45	
Th	0,28	0,73	0,11	-0,15	-0,16	-0,47	0,42	-0,24	0,82	0,54	-0,24	-0,37	0,88	0,65	0,89	0,90	0,93	0,94	0,95	0,84	0,90	0,89	0,89	0,88	0,85	0,87	0,91	-0,45	1	

(zawierających co najmniej 80% Si) wykazuje negatywny związek z Al, czyli wraz ze wzrostem zawartości ilów maleje zawartość kwarcu. Pozostała grupa, zawierająca mniej Si, a jednocześnie podwyższone zawartości Ca i Ba, nie wykazuje korelacji z Al. Można przypuszczać, że brak korelacji związany jest z większymi ilościami dodatków z płuczki.



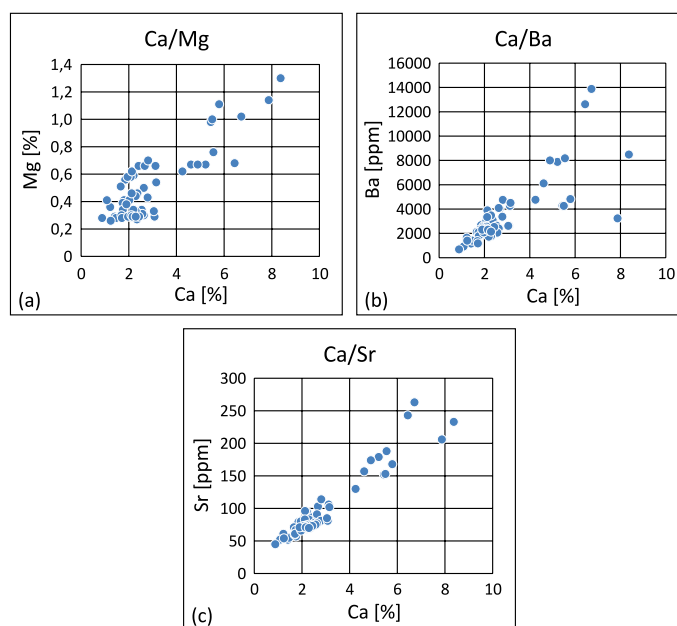
**Rysunek 5.** Wykresy korelacyjne Al/Rb (a), Al/Nd (LREE) (b) i Al/Lu (HREE) (c)

**Figure 5.** Correlation plots Al/Rb (a), Al/Nd (LREE) (b), and Al/Lu (HREE) (c)

**Glin** wykazuje bardzo dobrą korelację z rubidem (tabela 1, rysunek 5a), a jednocześnie nie koreluje z potasem. Jak wspomniano powyżej, K i Rb związane są z minerałami ilastymi, przy czym Rb podstawia K w strukturach mik i illitu (Fuller et al., 2015; Craigie, 2018). Występowanie Rb w tych minerałach potwierdza korelacja z Al. Brak korelacji Al z K wiąże się najprawdopodobniej z występowaniem K również w skaleniu potasowym. Glin koreluje również z lekkimi ziemiami rzadkimi (LREE) (tabela 1, rysunek 5b), co potwierdza tezę, że lekkie ziemie rzadkie współwystępują z glinem w minerałach ilastych (Craigie, 2018). W przypadku ciężkich ziem rzadkich (HREE) nie obserwuje się wyraźnej korelacji z glinem (tabela 1, rysunek 5c), co świadczy o tym, że nie wiążą się one z minerałami ilastymi. Pierwiastki te występują głównie w różnych minerałach ciężkich (Mange i Morton, 2007; Morton i Yaxley, 2007; Belousova et al., 2002).

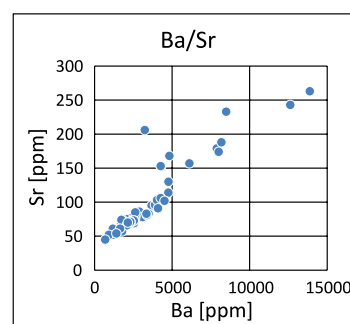
**Żelazo** nie koreluje z żadnymi pierwiastkami związanymi z węglanami, minerałami ilastymi bądź minerałami ciężkimi. Świadczy to tym, że pierwiastek ten związany jest tylko z hematytem.

**Wapń** koreluje z Mg (tabela 1, rysunek 6a) i Mn (tabela 1), co wiąże się z występowaniem tego pierwiastka w dolomicie.



**Rysunek 6.** Wykresy korelacyjne Ca/Mg (a), Ca/Ba (b) i Ca/Sr (c)  
**Figure 6.** Correlation plots Ca/Mg (a), Ca/Ba (b), and Ca/Sr (c)

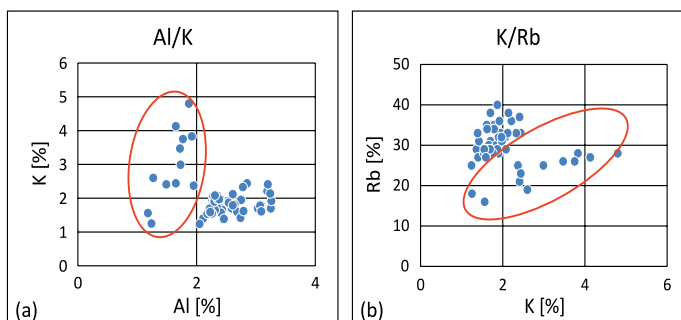
Wykazuje również związek z Ba (tabela 1, rysunek 6b), co świadczy o tym, że może być również związany z dodatkami z płuczki. Prawdopodobnie płuczka zawiera obok barytu również kalcyt. Na podstawie analizy rentgenowskiej nie stwierdzono kalcytu w próbkach rdzeni odpowiadających głębokościowo badanym zwiercinom. Kalcyt w badanych próbkach może więc pochodzić tylko z płuczki. Zaobserwowano również bardzo silną korelację Ca z Sr (tabela 1, rysunek 6c), co jest związane z podstawianiem Sr w strukturach kalcytu (Moore i Wade, 2013).



**Rysunek 7.** Wykres korelacyjny Ba/Sr  
**Figure 7.** Correlation plot Ba/Sr

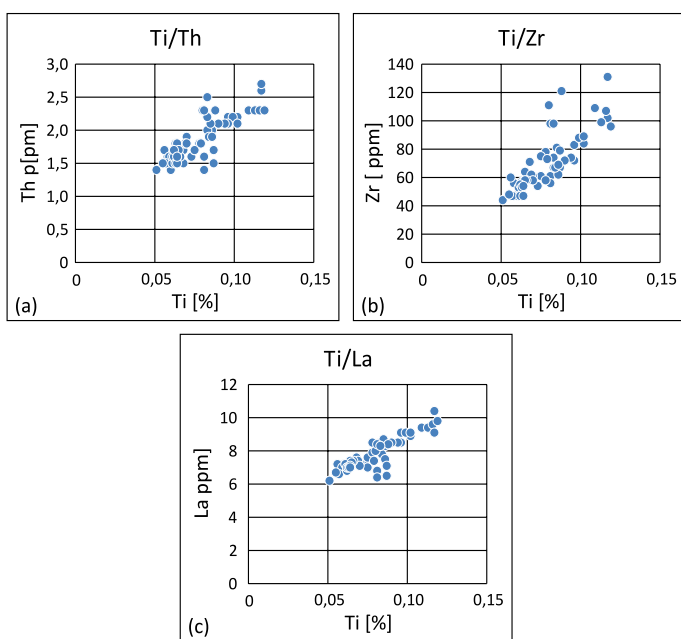
**Bar**, który występuje w barycie dodawanym do płuczki, koreluje z Sr (tabela 1, rysunek 7) i z Ca (tabela 1, rysunek 6b) oraz z Mn (tabela 1).

**Potas** jest niejednoznaczny pod względem powiązań z minerałami. Na wykresach korelacyjnych K z Al i K z Rb (rysunek 8a,b) można zaobserwować dwie grupy próbek. Grupy zakreślone na czerwono wykazują słaby związek K/Al i dobrą



**Rysunek 8.** Wykresy korelacyjne Al/K (a) i K/Rb (b)  
**Figure 8.** Correlation plots Al/K (a), and K/Rb (b)

korelację K/Rb, punkty te odpowiadają próbkom z góry profilu. W przypadku pozostałych próbek nie stwierdzono żadnych korelacji. Analiza rentgenowska próbek rdzeni odpowiadających głębokościowo badanym zwiercinom wykazała pewne zróżnicowanie składu mineralnego obu grup. Próbki z góry profilu (punkty zakreślone na czerwono) zawierają tylko skalenie potasowe, a w próbkach z dolnej części profilu stwierdzono zarówno skalenie potasowe, jak i plagioklazy.



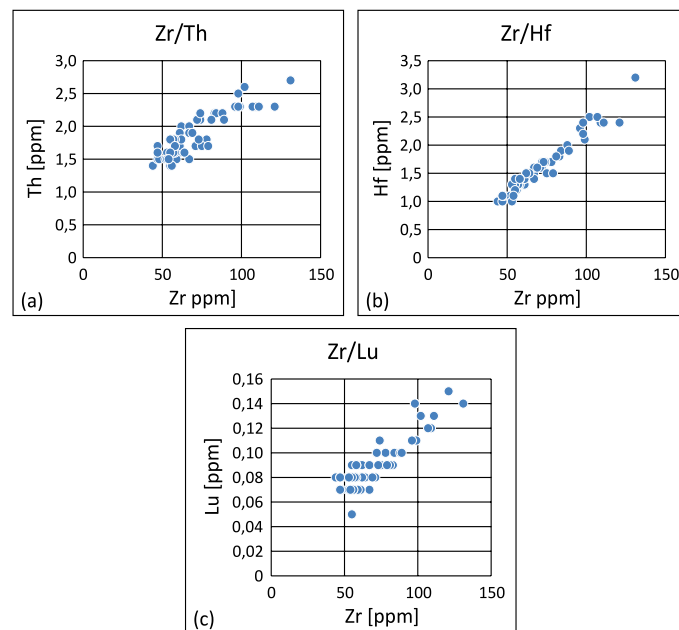
**Rysunek 9.** Wykresy korelacyjne Ti/Th (a), Ti/Zr (b) i Ti/La (c)  
**Figure 9.** Correlation plots Ti/Th (a), Ti/Zr (b), and Ti/La (c)

**Tytan** wykazuje najsilniejszy związek z LREE (pierwiastki lekkich ziem rzadkich) (tabela 1, rysunek 9c), dobrze koreluje również z Th, Zr (tabela 1, rysunek 9a,b) i Hf (tabela 1). Związki te mogą świadczyć o współwystępowaniu wymienionych pierwiastków w minerałach tytanu. W literaturze opisywane jest przykładowo występowanie Zr w rutylu (Mange i Morton, 2007).

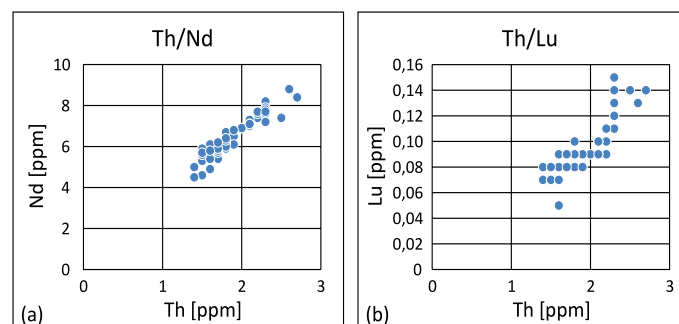
**Cyrkon i hafn** jako jedne z niewielu pierwiastków są ściśle związane z jednym minerałem – cyrkonem (Mange

i Morton, 2007), stąd ich bardzo dobra korelacja (tabela 1, rysunek 10b). Oba pierwiastki koreluje również bardzo dobrze z Th i HREE (tabela 1, rysunek 10a,c) i nieco słabiej z Ti i LREE (tabela 1).

**Tor** koreluje bardzo dobrze z Zr (tabela 1, rysunek 10a) i Hf (tabela 1) oraz z pierwiastkami ziem rzadkich (tabela 1, rysunek 11 a,b), a nieco słabiej z Ti (tabela 1, rysunek 9a).



**Rysunek 10.** Wykresy korelacyjne Zr/Th (a), Zr/Hf (b) i Zr/Lu(HREE) (c)  
**Figure 10.** Correlation plots Zr/Th (a), Zr/Hf (b), and Zr/Lu(HREE) (c)

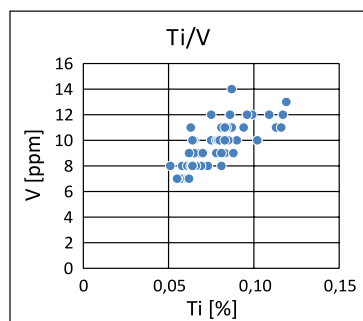


**Rysunek 11.** Wykresy korelacyjne Th/Nd(LREE) (a) i Th/Lu(HREE) (b)  
**Figure 11.** Correlation plots Th/Nd(LREE) (a), and Th/Lu(HREE) (b)

**Wanad** wykazuje pewną korelację z Ti (tabela 1, rysunek 12), natomiast związek z Al jest słaby, co świadczy o tym, że w badanych skałach pierwiastek ten nie ma związku z minerałami ilastymi. Wanad jest absorbowany przez minerały ilaste w warunkach anoksydacyjnych (Uddin, 2017; Craigie, 2018). Warunki takie nie występowały w trakcie tworzenia się badanych skał (czerwony spągowiec). V był opisywany



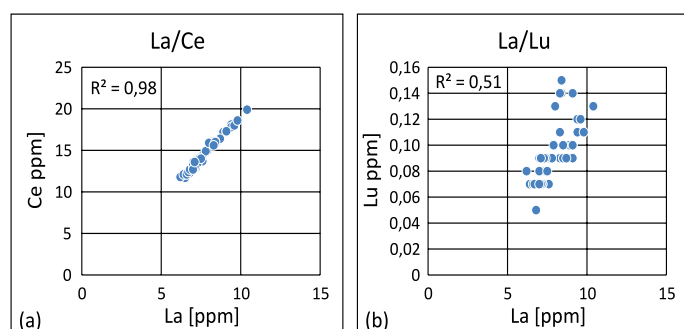
w minerałach Ti i Fe (ilmenit, magnetyt) (She et al., 2015; Craigie, 2018). Korelacja z Ti i brak zależności z Zr i Th mogą wskazywać na to, że w badanych skałach V kumuluje się głównie w minerałach ciężkich tytanu.



**Rysunek 12.** Wykres korelacyjny Ti/V  
**Figure 12.** Correlation plot Ti/V

**Lekkie ziemie rzadkie (LREE)** wykazują najlepsze korelacje ze sobą wzajemnie (tabela 1, rysunek 13a) i z Th (tabela 1, rysunek 11a) oraz (nieco słabiej) z Ti (tabela 1, rysunek 9c) i z Zr (tabela 1). Związki z ciężkimi ziemiami rzadkimi (HREE) są słabsze (tabela 1, rysunek 13b). Można więc stwierdzić, że LREE kumulują się w minerałach ciężkich, mogą jednak występować w nieco innych asocjacjach minerałów ciężkich niż HREE. Korelacja LREE z glinem (tabela 1, rysunek 5b) wskazuje na obecność tych pierwiastków także w minerałach ilastych.

**Ciężkie ziemie rzadkie (HREE)** związane są z minerałami ciężkimi (Craigie, 2018). Pierwiastki te są silnie skorelowane ze sobą nawzajem (tabela 1). Bardzo dobrze korelują też z Zr i Th (tabela 1, rysunki 10c i 11b) oraz z Hf (tabela 1). Związek z Ti (tabela 1) jest natomiast bardzo słaby. Wynika stąd, że HREE częściej kumulują się w cyrkonie i innych minerałach ciężkich, natomiast nie są związane z minerałami tytanu. Nie stwierdzono również korelacji z Al (tabela 1, rysunek 5c), co świadczy o tym, że pierwiastki te w przeciwieństwie do LREE nie występują w minerałach ilastych.



**Rysunek 13.** Wykresy La/Ce (LREE) (a) i La/Lu (LREE/HREE) (b)  
**Figure 13.** Correlation plots La/Ce (LREE) (a), and La/Lu (LREE/HREE) (b)

## Podsumowanie i wnioski

Analiza chemostratygraficzna umożliwia wydzielenie w profilach otworów wiertniczych charakterystycznych poziomów korelacyjnych w ramach istniejących podziałów stratygraficznych i litologicznych. Dla prawidłowego doboru wskaźników chemostratygraficznych niezbędne jest ustalenie związków między minerałami i pierwiastkami. W tym celu wykorzystywane są zarówno porównania składu chemicznego z wynikami uzyskanymi na podstawie innych metod badawczych (skład mineralny, analiza minerałów ciężkich, profilowania geofizyki otworowej), jak też analizy statystyczne danych geochemicznych. W przedstawionej pracy zastosowano metody statystyczne takie jak: analiza głównych składowych (PCA) i analiza korelacyjna. Uzyskane wyniki pozwoliły na scharakteryzowanie zależności pomiędzy pierwiastkami i wyciągnięcie następujących wniosków dotyczących powiązań składu mineralnego i chemicznego dla badanych skał czerwonego spągowca:

- **Krzem** związany jest z głównie kwarcem. Świadczą o tym: bardzo dobra korelacja zawartości krzemionki z kwarcem oraz wyodrębnienie Si jako osobnej grupy na wykresach wektorów własnych PCA.
- **Glin** gromadzi się w glinokrzemianach: minerałach ilastych i skaleniach. Wykazuje bardzo dobrą korelację z Rb, który podstawia K w strukturach mik i illitu. Al koreluje również z lekkimi ziemiami rzadkimi (LREE), co świadczy o tym, że lekkie ziemie rzadkie występują w minerałach ilastych.
- **Wapń** występuje w dolomicie, co potwierdza korelacja z Mg. Ca wykazuje również związek z Ba, co świadczy o tym, że może być również związany z dodatkami z płuczki. Prawdopodobnie płuczka zawiera obok barytu również kalcyt.
- **Stront** związany jest z kalcytem, o czym świadczy bardzo silna korelacja z Ca. Podstawia również Ba w strukturze barytu.
- **Bar** występuje w barycie dodawanym do płuczki.
- **Żelazo** kumuluje się w hematycie. Nie koreluje z żadnymi pierwiastkami związanymi z węglanami, minerałami ilastymi bądź minerałami ciężkimi.
- **Potas** występuje w mikach i illicie oraz w skaleniu potasowym. Ze względu na to, że związany jest z różnymi minerałami, związki z Al i Rb są niejednoznaczne. Na wykresach korelacyjnych wydzielają się dwie grupy punktów. Część próbek (reprezentująca górną część profilu), zawierająca tylko skałen potasowy, wykazuje słaby związek K/Al i dobrą korelację K/Rb. W przypadku pozostałych próbek, zawierających więcej skaleni, w tym również plagioklasy, nie stwierdzono żadnych korelacji. Dokładne zinterpretowanie

otrzymanych wyników wymaga przeprowadzenia dodatkowych badań skałeni (analizy w mikroskopie optycznym i skaningowym).

- **Tytan** tworzy różne minerały ciężkie, takie jak anataz, rutyl, tytanit, magnetyt, ilmenit, tytanomagnetyt. LREE, Th i Zr korelują z Ti, co świadczy o tym, że współwystępują z nim w podobnych minerałach ciężkich.
- **Cyrkon** i **hafn** są ściśle związane z jednym minerałem – cyrkonem, co pokazuje ich bardzo silna korelacja:  $R = 0,97$ . Korelują również bardzo dobrze z Th i HREE. Można więc domniemywać, że Th i HREE występują w cyrkonie.
- Wanad kumuluje się głównie w minerałach ciężkich tytanu, o czym świadczy korelacja z Ti i brak zależności pomiędzy V a Zr i Th.
- **Tor** pojawia się w różnych minerałach, silna korelacja z Zr wskazuje na szczególne powinowactwo do cyrkonu.
- **LREE** i **HREE** występują w minerałach ciężkich, o czym świadczą związki z Zr, Ti i Th. HREE są zdecydowanie silniej związane z Zr i Th niż Ti. Można więc domniemywać, że częściej kumulują się w cyrkonie niż w innych minerałach ciężkich. LREE wykazują korelację z Al, a więc występują częściowo też w minerałach ilastych, natomiast HREE nie wykazują powinowactwa do ilów.

Podsumowując, w publikacji scharakteryzowano związki pomiędzy pierwiastkami a minerałami w skałach z otworu Pł 3. Zaprezentowano właściwy sposób analizy danych geochemicznych, który jest podstawą budowania podziału chemostratygraficznego. Uzyskane wyniki umożliwią prawidłowy dobór wskaźników chemostratygraficznych i – co za tym idzie – wiarygodne wydzielenie poziomów chemostratygraficznych w badanym otworze. W pracy posłankowano się badaniami składu mineralnego wykonanymi na rdzeniach pobranych ze skał tej samej formacji, z głębokości zbliżonych do położenia badanych próbek okruchowych. Bardzo przydatne byłoby też wykonanie analizy wydzielonej asocjacji minerałów ciężkich – pozwoliłoby to na udokładnienie wniosków dotyczących tych minerałów. Analiza statystyczna pozwala stwierdzić, które pierwiastki powiązane są z minerałami ciężkimi. Badania wydzielonych minerałów ciężkich umożliwiłyby natomiast określenie, w jakich konkretnie minerałach występują analizowane pierwiastki.

Badania powinny być kontynuowane zarówno dla innych rejonów, jak i litologii (np. utwory fliszu karpackiego).

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Analiza paleośrodowiska utworów czerwonego spągowca na podstawie badań składu chemicznego i mineralnego skał*, praca INiG – PIB; nr zlecenia: 0021/SW/2023, nr archiwalny: DK-4100-0004/2023.

## Literatura

Balaram V., Ramkumar M., Akhtar R. Mir, 2023. Developments in analytical techniques for chemostratigraphy, chronostratigraphy,

and geochemical fingerprinting studies: Current status and future trends. *Journal of South American Earth Sciences*, 129: 104528. DOI: 10.1016/j.jsames.2023.104528.

Basu A., 2003. A perspective on quantitative provenance analysis. [W:] Valloni R., Basu A. (eds.). *Quantitative Provenance Studies in Italy. Memorie Descrittive della Carta Geologica dell'Italia*, 61: 11–22.

Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Fisher N.I., 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143: 602–622. DOI: 10.1007/s00410-002-0364-7.

Craigie N.W., 2015. Application of chemostratigraphy in Middle Jurassic unconventional reservoirs in eastern Saudi Arabia. *GeoArabia*, 20(2): 79–110. DOI: 10.2113/geoarabia200279.

Craigie N.W., 2018. Principles of Elemental Chemostratigraphy – a Practical User Guide. *Springer Verlag*. DOI: 10.1007/978-3-319-71216-1.

Craigie N.W., Breuer P., Khidir A., 2016. Chemostratigraphy and Biostratigraphy of Devonian, Carboniferous and Permian sediments encountered in eastern Saudi Arabia: An integrated approach to reservoir correlation. *Marine and Petroleum Geology*, 72: 156–178. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2016.01.018.

Craigie N.W., Rees A.J., 2016. Chemostratigraphy of glaciomarine sediments in the Sarah Formation, northwest Saudi Arabia. *Journal of African Earth Sciences*, 117: 263–284. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2016.02.006.

Craigie N.W., Scheibe C., 2023. Utilization of chemostratigraphy to the subregional scale correlation of Permo–Carboniferous sediments, eastern Saudi Arabia. *Petroleum Geoscience*, 29(3). DOI: 10.1144/petgeo2023-007.

Eisenberg R.A., Harris P.M., 1995. Application of chemostratigraphy in multivariate statistical analysis to differentiating bounding stratigraphic surfaces. [W:] Pause P.H., Candelaria M.P. (eds.). *Carbonate Facies and Sequence Stratigraphy: Practical Applications of Carbonate Models. Permian Basin section-SEPM publication, Permian Basin Graduate Center Publication*, 5: 83–102.

Fuller A.J., Shaw S., Ward M.B., Haigh S., Mosselmans J.F., Peacock C.L., Stackhouse S., Dent A.J., Trivedi D., Burke I.T., 2015. Caesium incorporation and retention in illite interlayers. *Applied Clay Science*, 108: 128–134. DOI: 10.1016/j.clay.2015.02.008.

Garcia L.G., Oliveira G., Oliveira J., Silveira A.S., Cardoso M., Oliveira R.G., Rigo S.J., 2023. Machine Learning Techniques in Chemostratigraphy: A Systematic Literature Review. *Techniques in Chemostratigraphy*.

Jolliffe I.T., 2002. Principal Component Analysis. *Springer Series in Statistics, Springer Verlag*.

Kishida A., Riccio L., 1980. Chemostratigraphy of lava sequences from the Rio Itapicuru Greenstone Belt, Bahia State, Brazil. *Precambrian Research*, 1(2): 161–178.

Kowalska S., 2013. Określenie ilościowego składu mineralnego skał zawierających minerały ilaste metodą Rietveld. *Nafta-Gaz*, 69(12): 894–902.

MacLean W.H., Barrett T.J., 1993. Lithochemical techniques using immobile elements. *Journal of Geochemical Exploration*, 48(2): 109–133. DOI: 10.1016/0375-6742(93)90002-4.

Mange M.A., Morton A.C., 2007. Chapter 13 Geochemistry of Heavy Minerals. [W:] Mange M.A., Wright D.T. (eds.). *Heavy Minerals in Use*: 345–391. DOI: 10.1016/S0070-4571(07)58013-1.

Moore C.H., Wade W.J., 2013. Carbonate reservoirs: porosity and diagenesis in a sequence stratigraphic framework. Developments in sedimentology. Edition 2<sup>nd</sup>. *Elsevier Science, Amsterdam, Burlington*.

- Morton A.C., Yaxley G., 2007. Detrital apatite geochemistry and its application in provenance studies. [W:] Arribas J., Critelli S., Johnson M.J. (eds.). *Sediment provenance and petrogenesis: perspectives from petrography and geochemistry Geological Society of America. Special Paper*, 420: 319–344.
- Okoń J., 1964. Analiza czynnikowa w psychologii. *PWN, Warszawa*.
- Pearce T.J., Jarvis I., 1992. Applications of geochemical data to modeling sediment dispersal patterns in distal turbidites: Late Quaternary of the Madeira abyssal plain. *Journal of Sedimentary Petrology*, 62(6): 1112–1129. DOI: 10.1306/D4267A64-2B26-11D7-8648000102C1865D.
- Ramkumar M., 2015. Toward standardization of terminologies and recognition of chemostratigraphy as a formal stratigraphic method. [W:] Ramkumar M. (eds.), *Chemostratigraphy – Concepts, techniques, and applications. Elsevier, Amsterdam*: 1–22.
- Ratcliffe K.T., Martin J., Pearce T.J., Hughes A.D., Lawton D.E., Wray D.S., Bessa F., 2006. A regional chemostratigraphically-defined correlation framework for the Late Triassic TAG-I Formation in Blocks 402 and 405a, Algeria. *Petroleum Geoscience*, 12: 3–12. DOI: 10.1144/1354-0709305-669.
- She Y.W., Song X.Y., Yu S.Y., He H.L., 2015. Variations of trace element concentration of magnetite and ilmenite from the Taihe layered intrusion, Emeishan large igneous province, SW China: Implications for magmatic fractionation and origin of Fe-Ti-V oxide ore deposits. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113: 1117–1131. DOI: 10.1016/j.jseaes.2015.03.029.
- Smith L.I., 2002. A Tutorial on Principal Component Analysis. *University of Otago, New Zealand*.
- Uddin M.K., 2017. A review on the adsorption of heavy metals by clay minerals, with special focus on the last decade. *Chemical Engineering Journal*, 308: 438–462. DOI: 10.1016/j.cej.2016.09.029.
- Weltje G.J., von Eynatten H., 2004. Quantitative provenance analysis of sediments: review and outlook. *Sedimentary Geology*, 171: 1–11. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2004.05.007.
- Zhengyong Q., Xiuen Y., Mingmei J., 1985. Chemostratigraphic correlation of the middle and upper Proterozoic between Yanshan and Shennogjia Basins. *Precambrian Research*, 29: 77–91. DOI: 10.1016/0301-9268(85)90061-0.



Mgr Anna PRZELASKOWSKA  
Starszy specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie Geofizyki Wiertniczej  
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Lubicz 25 A  
31-503 Kraków  
E-mail: [anna.przelaskowska@inig.pl](mailto:anna.przelaskowska@inig.pl)



Mgr Urszula ZAGÓRSKA  
Asystent w Zakładzie Geofizyki Wiertniczej  
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Lubicz 25 A  
31-503 Kraków  
E-mail: [urszula.zagorska@inig.pl](mailto:urszula.zagorska@inig.pl)

## OFERTA BADAWCZA ZAKŁADU SEJSMIKI

- przetwarzanie danych sejsmicznych 2D Prestack i Poststack;
- przetwarzanie i interpretacja pionowych profilowań sejsmicznych PPS 1C/3C;
- interpretacja strukturalna i litofacjalna danych sejsmicznych 2D i 3D;
- budowa modeli prędkościowych w domenie czasu i głębokości (na podstawie danych sejsmicznych i geofizyki otworowej) na potrzeby konwersji czas-głębokość oraz migracji głębokościowej;
- poprawa rozdzielczości danych sejsmicznych z wykorzystaniem procedury dekompozycji spektralnej;
- konstrukcja map powierzchniowych w domenie czasu i głębokości;
- opracowanie i analiza map atrybutów sejsmicznych, inwersji sejsmicznej, dekompozycji spektralnej;
- obliczanie inwersji symultanicznej oraz stochastycznej na danych sejsmicznych;
- wyznaczenie obszarów perspektywicznych dla formacji tępokowych (*sweet spots*) oraz wskaźników DHI dla złóż konwencjonalnych na danych sejsmicznych;
- prognozowanie ciśnień porowych na podstawie danych sejsmicznych i geofizycznych;
- interpretacja parametrów petrofizycznych w przestrzeni okołotworowej w oparciu o pomiary pionowego profilowania sejsmicznego (PPS);
- kompleksowa interpretacja geologiczno-złożowa w oparciu o zintegrowane dane geologiczne i geofizyczne (analiza cech makroskopowych rdzeni wiertniczych, objawy i wyniki prób złożowych, profilowania geofizyki otworowej, interpretacja sejsmiczna);
- szczegółowa interpretacja sejsmostratygraficzna kompleksów skał klastycznych i węglanowych z wykorzystaniem metody stratygrafii sekwencji.

