

# Wykorzystanie języka programowania R oraz chatbota *Microsoft Copilot* do klasyfikacji piroksenów na przykładzie minerałów pochodzących z dajki nefelinitowej, kamieniołom *Folwark* (Śląsk Opolski)

Monika Nowak<sup>1</sup>



**The use of the R programming language and the Microsoft Copilot chatbot for the classification of pyroxenes, based on the example of minerals from a nephelinite dyke, *Folwark* quarry (Opole Silesia).** Prz. Geol., 73: 420–423; doi: 10.7306/2025.46

*Abstract.* Advances in technology and an increased access to new research techniques allow for the creation of huge databases documenting the chemical composition of minerals. At the same time, traditional processing of very large amounts of data is time-consuming and inefficient. The paper presents one of the ways of using artificial intelligence to automate data processing. The Microsoft Copilot chatbot helps to create source code in the R language, generating a pyroxene classification triangle in a very short time (Morimoto et al., 1988). The basic classification of pyroxenes was then used to distinguish the relationships between the minerals occurring in the nephelinite dyke in the *Folwark* quarry, and helped to consider different scenarios for the genesis and transport of this rock.

**Keywords:** Pyroxene classification, R programming language, Microsoft Copilot chatbot

Niniejszy artykuł skupia się na prezentacji kodu źródłowego napisanego przez autorkę w języku R. Przy pisaniu kodu korzystano z pomocy sztucznej inteligencji (AI) chatbota *Microsoft Copilot*, jako narzędzia wspomagającego. Przedstawiony kod źródłowy służy do generowania diagramu klasyfikacyjnego piroksenów (Morimoto i in., 1988). Możliwości niniejszego kodu zademonstrowano na analizach chemicznych piroksenów uzyskanych w trakcie badań naukowych prowadzonych przez autorkę. Na podstawie wygenerowanych diagramów klasyfikacyjnych przeprowadzono bardzo wstępną analizę petrologiczną badanych minerałów.

Skąła wulkaniczna oraz ksenolity perydotytowe i piroksenitowe pochodzące z dajki nefelinitowej odkrytej w kamieniołomie kredowych margli *Folwark* na Śląsku Opolskim zawierają kilka generacji piroksenów (Px), które znacząco różnią się od siebie genezą oraz składem chemicznym. W wyniku intensywnych badań naukowych, prowadzonych w latach 2016–2020 we współpracy z prof. UAM dr hab. Moniką Kowal-Linką, w badanych skałach udało się wykonać w sumie ponad 1150 analiz chemicznych w 14 typach minerałów (m.in. oliwniów, piroksenów, spineli, nefelinów, węglanów itd.). Analizy wykonano za pomocą mikroskopy elektronowej Cameca SX-100 w Laboratorium Mikroskopii Elektronowej, Mikroanalizy i Dyfrakcji Rentgenowskiej na Wydziale Geologii Uniwersytetu Warszawskiego. W trakcie analizy jako standardy wykorzystano materiały naturalne i syntetyczne, analizy były wykonane przy napięciu przyspieszającym 15 kV i natężeniu 20 nA. Czas zliczania wynosił 20 s dla pików oraz  $2 \times 10$  s dla tła; wielkość wiązki była zmienna w zależności od badanej fazy. Analizy piroksenów (540 analiz) stanowią najliczniejszy zbiór badanych minerałów i zostały wykorzystane jako przykładowa baza danych chemicznych, która może być analizowana petrologicznie.

Najbardziej podstawowy podział badanych piroksenów występujących zarówno w skałe wulkanicznej, jak i towarzyszących jej ksenolitach obejmuje trzy grupy. Grupę I tworzą fenokryształy i kryształy w cieście skalnym występujące w nefelinicie, grupę II – kryształy piroksenów ze stref ocelli i żyłek powstałych w trakcie interakcji nefelinitu z marglem, a grupę III tworzą wszystkie kryształy klinopiroksenów (Cpx) i ortopiroksenów (Opx) występujących w ksenolitach (zarówno kryształów skałotwórczych, jak i wrostki Cpx w Opx, kryształy wewnątrz tzw. *melt pockets* oraz kryształy Cpx występujące na krawędziach ksenolitów).

Autorka przeprowadziła wstępną analizę składu chemicznego piroksenów z poszczególnych grup, wykorzystując do tego diagram klasyfikacyjny, oraz zawartości wapnia, żelaza i magnezu, które są niezbędne do przeliczenia członów skrajnych trójkąta. Szczególny nacisk położono na nieoczywiste podobieństwa i różnice pomiędzy grupą I i II, związaną z nefelinitem, a minerałami z grupy III. Analiza porównawcza poszczególnych grup piroksenów posłużyła do postawienia hipotez na temat sposobu transportu magmy w obrębie płaszcza litosferycznego i skorupy. Natomiast autorski kod źródłowy przedstawiony w niniejszym artykule jest uniwersalny i może posłużyć jako podstawa do klasyfikacji piroksenów przez innych badaczy, również w innych typach skał.

## METODYKA

Istnieje wiele arkuszy kalkulacyjnych i programów komputerowych służących do przeliczania składu chemicznego i klasyfikacji minerałów ([https://serc.carleton.edu/research\\_education/equilibria/mineralformulaerecalculation.html](https://serc.carleton.edu/research_education/equilibria/mineralformulaerecalculation.html); <https://www.gabbrosoft.org/spreadsheets/>; Gündüz, Kürşad, 2023; Janoušek i in., 2024; Walters, Gies, 2025). Mimo to

<sup>1</sup> Instytut Geologii, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, ul. Bogumiła Krygowskiego 12, 61-680 Poznań; [mnap@amu.edu.pl](mailto:mnap@amu.edu.pl); ORCID ID: 0000-0002-1112-2463

klasyfikacja minerałów w dużych bazach danych może nadal powodować pewne trudności (głównie chodzi o dobrą identyfikację poszczególnych analiz, a nie graficzne przedstawienie nieopisanej chmury punktów). W przypadku klasyfikacji piroksenów IMA (*International Mineralogical Association*) zaleca klasyfikację Morimoto (Morimoto i in., 1988; <https://cnmnc.units.it/mineral-group.php>). Jest ona oparta na wykresie trójkątnym, co uniemożliwia jej przygotowania np. w arkuszach kalkulacyjnych *Microsoft Excel* i wymaga zastosowania innych programów jak np. *Grapher*. Do lutego 2025 r. do przygotowania trójkątów klasyfikacyjnych autorka używała własnych arkuszy kalkulacyjnych *Excel* z klasyfikacją przygotowaną wg kroków z *An Introduction to the Rock Forming Minerals* (Deer i in., 2013), połączonych z programem graficznym *Grapher*. Rozwiązanie to, mimo że pozwala uzyskać wykresy klasyfikacyjne o bardzo dużej estetyce graficznej, jest bardzo czasochłonne.

Prezentowany poniżej kod źródłowy napisany w języku *R* skracza czas potrzebny do generowania poszczególnych wykresów do ok. 5 sekund. Język programowania *R* obok języka programowania *Python*, może m.in. posłużyć do przygotowywania bardzo profesjonalnych wykresów, które często są wykorzystywane w publikacjach naukowych (Nowosad, 2020; Petrelli, 2021).

Wraz z wprowadzeniem chatbota *Microsoft Copilot* w języku polskim przez firmę *Microsoft* w styczniu 2025 r., jako stałego elementu programu TEAMS, wykorzystanie możliwości sztucznej inteligencji (AI) stało się jednym z dodatkowych narzędzi pracy zawodowej. Na Uniwersytecie Adama Mickiewicza w Poznaniu istnieje ścisła instrukcja, która określa zakres, w jakim pracownicy i studenci UAM mogą się posługiwać AI w swojej pracy naukowej (<https://amu.edu.pl/nauka/si/praca-naukowa>). Autorka wykorzystuje AI głównie jako narzędzie wspomagające, do rozwijania swoich umiejętności programistycznych. *Chatbot Copilot* należy do najpopularniejszych tzw. dużych modeli językowych LLM, a jego użyteczność jest testowana w różnych dziedzinach nauk (Salman i in., 2025). Konwersacja z chatbotem *Copilot*, skróciła czas potrzebny do napisania kodu do ok. 5 godzin, co bardzo przyspieszyło pracę programistyczną.

## WYKORZYSTANIE JĘZYKA PROGRAMOWANIA R W CELU WYKONANIA DIAGRAMU KLASYFIKACYJNEGO DLA KLINOPIROKSENÓW

Poniżej zamieszczono kod źródłowy dla klasyfikacji piroksenów napisany w języku *R* dla interpretera *RStudio* (wersja 4.2.3). Arkusz *Microsoft Excel* (załącznik elektroniczny), który stanowi podstawę danych do generowania wykresu, został zorganizowany w taki sposób, aby zawierał dane o próbkach:

- numer analizy (kolumna opcjonalna);
- numer analizowanego kryształu (kolumna opcjonalna);
- wartości Wo (Ca.norm), Fs (Fe.norm), En (Mg.norm) (kolumny obowiązkowe);
- typ analizowanego kryształu: najbardziej podstawowy podział Px (kolumna opcjonalna).

Podstawowy kod źródłowy dla pojedynczego wspólnego wykresu klasyfikacyjnego (ryc. 1A), bez dodatkowego rozróżnienia na grupy kryształów, składa się z trzech kroków:

1. Załadowanie odpowiednich bibliotek w celu wykorzystania danych z arkusza kalkulacyjnego oraz późniejszego wygenerowania diagramów:

```
library(openxlsx) #biblioteka umożliwiająca otwarcie pliku xlsx,
library(ggplot2) #biblioteka umożliwiająca generowanie podstawowych wykresów,
library(ggtern) #biblioteka umożliwiająca wykresów trójkątnych.
```

2. Załadowanie danych z konkretnego arkusza kalkulacyjnego (po ustaleniu lokalizacji pliku):

```
setwd("C:/DANE/MONIKA_NOWAK/r/r_proby") # wskazanie
gdzie na dysku znajduje się plik.xlsx
FolwarkCpx<-read.xlsx("klas_test_2025.xlsx ", sheet=1) #załadowanie pliku
```

3. Wygenerowanie diagramu klasyfikacyjnego piroksenów:

```
ggtern(data = FolwarkCpx, aes(x = Mg.norm, y = Ca.norm, z =
  Fe.norm)) +
geom_point() +
theme_bw() +
labs(title = "Klasyfikacja piroksenów",
T = "Wo",
L = "En",
R = "Fs") +
geom_Tline(Tintercept = 0.5, color = "black", linetype = "solid") +
geom_Tline(Tintercept = 0.45, color = "black", linetype = "solid") +
geom_Tline(Tintercept = 0.05, color = "black", linetype = "solid") +
geom_Tline(Tintercept = 0.2, color = "black", linetype = "solid") +
geom_segment(aes(x = 0.5, y = 0.05, z = 0.50, xend = 0.5, yend =
  0.0001, zend = 0.5),
  color = "black", linetype = "solid") +
geom_segment(aes(x = 0.5, y = 0.80, z = 0.50, xend = 0.5, yend =
  1.00, zend = 0.5),
  color = "black", linetype = "solid") +
theme(
tern.axis.text.T = element_text(size = 5, angle = 0, hjust = 0.5),
#element_text(size = 5, angle = 0, hjust = 0.5),
tern.axis.text.L = element_blank(),
tern.axis.text.R = element_blank(),
tern.axis.ticks.T = element_line(size = 0.5, linetype = "solid"),
tern.axis.ticks.L = element_line(size = 0.5),
tern.axis.ticks.R = element_line(size = 0.5)
) +
scale_T_continuous(breaks = seq(0, 1, by = 0.1)) +
scale_L_continuous(breaks = seq(0, 1, by = 0.1)) +
scale_R_continuous(breaks = seq(0, 1, by = 0.1)) +
annotate("text", x = 0.8, y = 0.041, z = 0.3,
  label = "Klinoferrosilite", color = "black", size = 2, hjust = 0.5) +
annotate("text", x = 0.8, y = 0.091, z = 2.0,
  label = "Klinoferrosylite", color = "black", size = 2, hjust = 0.5) +
annotate("text", x = 0.5, y = 0.15, z = 0.5,
  label = "Pigeonite", color = "black", size = 2, hjust = 0.5) +
annotate("text", x = 0.5, y = 0.5, z = 0.5,
  label = "Augite", color = "black", size = 2, hjust = 0.5) +
annotate("text", x = 0.8, y = 1.0, z = 0.3,
  label = "Diopside", color = "black", size = 2, hjust = 0.5) +
annotate("text", x = 0.3, y = 1.0, z = 0.8,
  label = "Hedenbergite", color = "black", size = 2, hjust = 0.5)
```

Powyższy kod nie jest doskonały – w wyniku jego użycia pojawia się 14 ostrzeżeń, które dotyczą położenia linii oddzielających poszczególne pola klasyfikacyjne np. diopsyd od augitu. Mimo że ostrzeżenia nie utrudniają generowania dosyć czytelnego wykresu, to muszą zostać usunięte

w najbliższej przyszłości. W trakcie wstępnej petrologicznej analizy porównawczej skorzystano ze zmodyfikowanego trójkąta klasyfikacyjnego zawierającego na jednym wykresie nazwy zarówno dla klino-, jak i ortopiroksenów (ryc. 1).

### UZYSKANE WYNIKI WSTĘPNEJ ANALIZY PORÓWNAWCZEJ PIROKSENÓW

Grupa I piroksenów obejmuje dwa fenokryształy i wszystkie kryształy z ciasta skalnego (ryc. 2). Dane plasują się w trzech polach klasyfikacyjnych:

1. klinoenstatytu/enstatytu: analiza wykonana w centralnej części dużego fenokryształu,
2. diopsydu: analiza centralnej części drugiego fenokryształu,
3. reszta analiz w większości znajduje się powyżej pola klasyfikacyjnego diopsydów i wpada w pole wollastonitu (ryc. 1B).

Grupa II reprezentuje kryształy Px z ocelli oraz żyłek w obrębie nefelinitu, Px znajdują się nad polem diopsydu oraz w polu hedenbergitu (ryc. 1B).

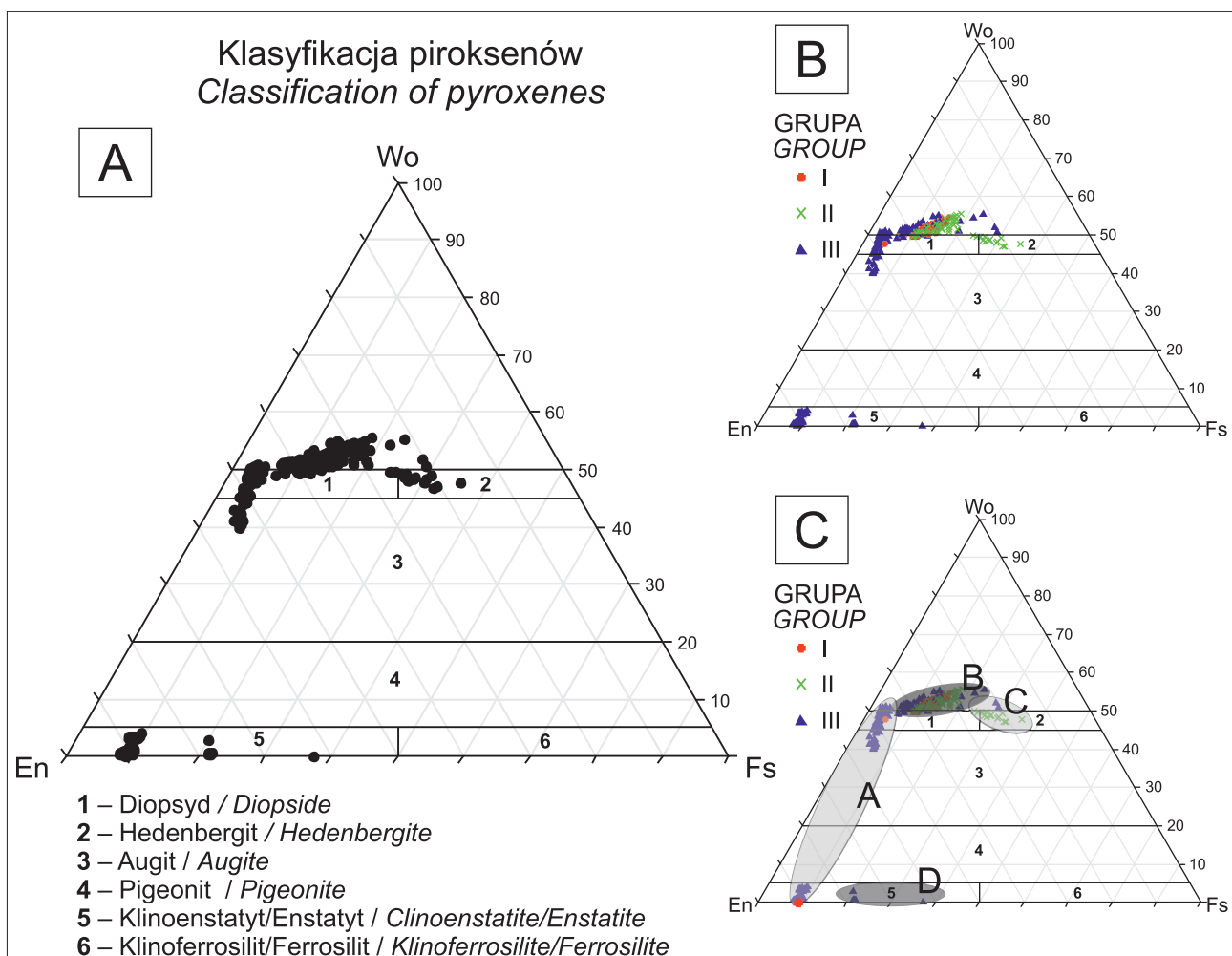
Do grupy III zaklasyfikowano wszystkie kryształy pochodzące z ksenolitów perydotytowych i piroksenitowych

zajmują pole enstatytu oraz częściowo augitu, diopsydu oraz w polu powyżej diopsydu i częściowo hedenbergitu (ryc. 1B). Obserwując trendy w analizach, wyniki z wykresu klasyfikacyjnego można pogrupować w grupy A, B, C i D (ryc. 1C).

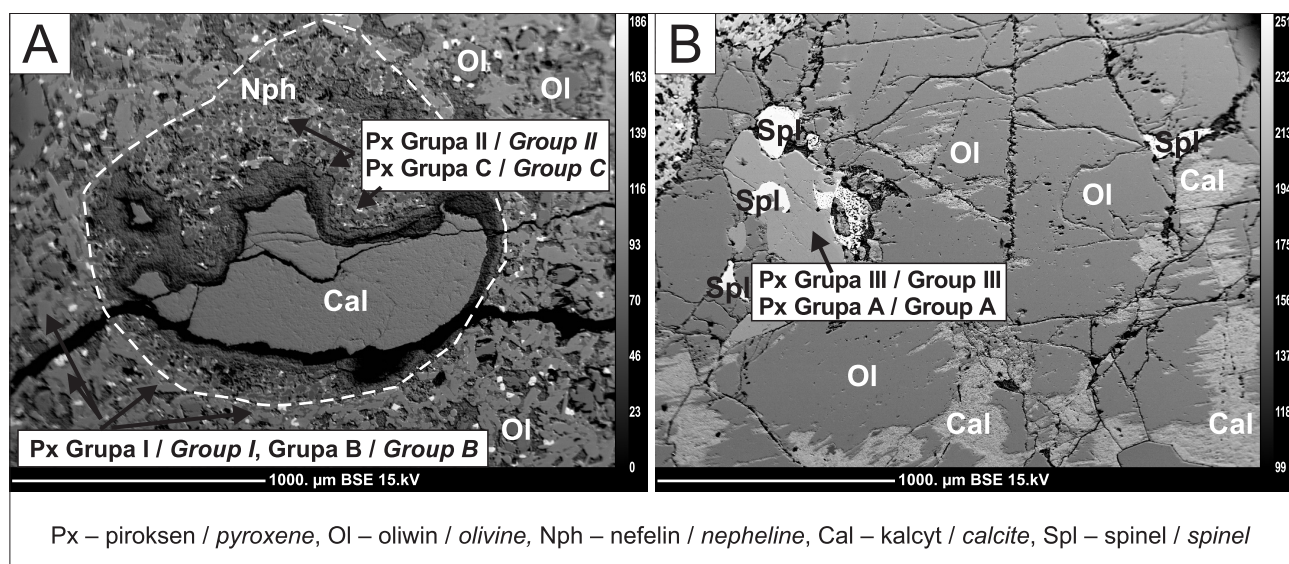
### DYSKUSJA

W trakcie prac kameralnych wygenerowano w sumie kilkanaście wykresów zarówno dla głównych typów piroksenów, jak i ich podtypów, po nieznacznej modyfikacji prezentowanego kodu. Przed publikacją, uzyskane diagramy zostały poddane drobnym zmianom w programie *Corel*.

Po przeanalizowaniu uzyskanych wykresów stwierdzono, że w grupie A znajdują się głównie analizy kryształów piroksenów o wysokiej liczbie magnezowej pochodzących z ksenolitów (ryc. 2B) oraz jądra fenokryształów (właściwie ksenokryształów). W grupie B występują wszystkie Px z ciasta skalnego (ryc. 2A), część Px pochodzących z ksenolitów oraz kryształy zlokalizowane w ocelli, grupa C jest związana głównie z ocelli i dodatkowo obejmuje tylko 4 analizy z ksenolitów (ryc. 2A).. Grupa D obejmuje ortopirokseny o pomniejszonej zawartości magnezu, co już było obserwowane w innych odsłonięciach (Matusiak-Małek



**Ryc. 1.** Klasyfikacje piroksenów ze skał w odsłonięciu *Folwark*: **A** – wygenerowana na podstawie przedstawionego kodu źródłowego, **B** – z podziałem na grupy I, II i III, **C** – dodatkowy podział na grupy piroksenów o podobnym składzie chemicznym: A, B, C, D  
**Fig. 1.** Classifications of pyroxenes from rocks in the *Folwark* exposure: **A** – generated from the source code provided, **B** – subdivided into groups I, II and III, **C** – additional subdivision into groups of pyroxenes of similar chemical composition: A, B, C, D



**Ryc. 2.** Zdjęcia BSE skał pochodzących z kamieniołomu *Folwark*: **A** – ocelli nefelinowo-piroksenowe z kalcytem (białe przerywane linie) w cieście skalnym zbudowanym głównie z piroksenów, **B** – fragment ksenolitu perydotytowego z widocznymi klinopiroksenem  
**Fig. 2.** BSE photos of rocks from the *Folwark* quarry: **A** – nepheline-pyroxene ocelli with calcite (white dashed lines) in a rock cake composed mainly of pyroxenes, **B** – peridotite xenolith with visible clinopyroxene

i in., 2017). Hipoteza robocza zakłada, że analizy w grupie A i D są powiązane ze skałami płaszczka litosferycznego, analizy w grupie B reprezentują Px z nefelinitem, natomiast Px z grupy C odpowiadają interakcji pomiędzy nefelinitem, a margle, w który intrudował. Bardzo ciekawą kwestią pozostaje silne wzbogacenie w Ca kryształów z grupy B, które może być związane z interakcją pomiędzy skałą wulkaniczną, a otaczającą go skałą węglanową. Kwestią otwartą pozostaje, czy proces odpowiedzialny za wzbogacenie w wapń można powiązać z asymilacją skał otoczenia w trakcie krystalizacji piroksenów, czy z dyfuzją Ca w trakcie stygnięcia dajki. Wstępnie zakłada się trzy scenariusze: 1) transport materiału w postaci mieszaniny kryształów (tzw. *crystal mush*), 2) mieszanie magm w głębokim rezerwarze np. na granicy płaszcz i skorupa, 3) mieszanie magm w trakcie transportu mieszaniny kryształów w obrębie płaszczka lito- sferycznego lub skorupy.

## WNIOSKI

W wyniku przeprowadzonej wstępnej analizy porównawczej zauważono wyraźne powiązania pomiędzy składem chemicznym piroksenów występujących w skale wulkanicznej jak i ksenolitach, co potwierdza złożoną genezę badanej skały. Do rozwiązania kwestii rodzaju transportu magmy z miejsca wytopienia, oczywiście potrzebna jest głębsza analiza wszystkich danych pochodzących z tego odsłonięcia. Kod wygenerowany przez *Microsoft Copilot* był kodem wspomagającym przy pisaniu własnego kodu źródłowego. Nie jest on jednak idealny, wymaga poprawek, ale jednocześnie znacząco przyspieszył proces programistyczny, co z pewnością będzie wykorzystywane w przyszłości.

Do korekcji języka angielskiego wykorzystano narzędzia AI: *Google Translator* i *DeepL*.

Pamięci zmarłej w 2024 r. Prof. UAM dr hab. Moniki Kowal-Linki, która zidentyfikowała dawkę nefelinitową w kamieniołomie margli *Folwark* i była inicjatorem prac naukowych poświęconych temu tematowi. Autorka serdecznie dziękuje Recenzentom za cenne uwagi.

## LITERATURA

- DEER W.A., HOWIE R.A., ZUSSMAN J. 2013 – An Introduction to the Rock Forming Minerals (3<sup>rd</sup> edition), 498 p. The Mineralogical Society, Londyn.
- GÜNDÜZ M., KÜRŞAD A. 2023 – MagMin\_PT: An Excel-based mineral classification and geothermobarometry program for magmatic rocks. *Mineralogical Magazine*, 87: 1–9. [https://serc.carleton.edu/research\\_education/equilibria/mineralformula-erecalculation.html](https://serc.carleton.edu/research_education/equilibria/mineralformula-erecalculation.html)
- <https://www.gabbrosoft.org/spreadsheets/>
- <https://cnmnc.units.it/mineral-group.php>
- <https://amu.edu.pl/nauka/si/praca-naukowa>
- JANOŰSEK V., FARROW C.M., ERBAN V. 2024 – GCDkit.Mineral: A customizable, platform-independent R-language environment for recalculation, plotting, and classification of electron probe microanalyses of common rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 109: 1598–1607.
- MATUSIAK-MAŁEK M., PUZIEWICZ J., NTAFLS T., GRÉGOIRE M., KUKUŁA A., WOJTULEK P.M. 2017 – Origin and evolution of rare amphibole-bearing mantle peridotites from Wilcza Góra (SW Poland), Central Europe. *Lithos*, 286: 302–323.
- MORIMOTO N., FABRIES J., FERGUSON A.K., GINZBURG I.V., ROSS M., SEIFERT F.A., ZUSSMAN J., AOKI K., GOTTARDI G. 1988 – Nomenclature of Pyroxenes. *Mineralogical Magazine*, 73: 1123–1133.
- NOWOSAD J. 2020 – Elementarz programisty: wstęp do programowania używając R. Wydanie pierwsze. Poznań: Space A.
- PETRELLI M. 2021 – Introduction to Python in Earth Science Data Analysis: From Descriptive Statistics to Machine Learning, Springer.
- SALMAN I.M., AMEER O.Z., KHANFAR M.A., HSIEH Y.H. 2025 – Artificial intelligence in healthcare education: evaluating the accuracy of ChatGPT, Copilot, and Google Gemini in cardiovascular pharmacology. *Frontiers in Medicine*, 12: 1495378.
- WALTERS J.B., GIES N.B. 2025 – MinPlotX: A powerful tool for formula recalculation, visualization, and comparison of large mineral compositional datasets. *Mineralogia*, 56: 13–22.

Praca wpłynęła do redakcji 5.03.2025 r.  
 Akceptowano do druku 26.03.2025 r.