

Tadeusz A. PRZYLIBSKI<sup>1</sup>, Katarzyna ŁUSZCZEK<sup>1</sup>, Ryszard KRYZA<sup>2</sup>,  
Konrad BLUTSTEIN<sup>1</sup>

# Nowy chondryt zwyczajny H5, S2, W1: Northwest Africa 11778

## A new ordinary chondrite H5, S2, W1: Northwest Africa 11778

**Abstract:** Based on petrological, mineralogical and geochemical analyses, the authors classified the new meteorite Northwest Africa 11778 as an ordinary chondrite H5, S2, W1. It is a single stone with mass 767.5 g and with well-preserved black fusion crust with brown shade (Fig. 1). This meteorite was found in Sahara Desert and it was purchased by Wrocław University of Science and Technology, Faculty of Geoengineering, Mining and Geology from Moroccan dealer in Zagora in June 2013. The most characteristic component of analyzed chondrite are different types of chondrules (barred olivine – BO, porphyritic olivine – PO, granular olivine – GO, radial pyroxene – RP, porphyritic olivine-pyroxene – POP, cryptocrystalline – C) (Fig. 2), which constitute 75% of meteorite. Their size is in range 0.2–1.2 mm, with average chondrule size ca. 0.6 mm. Bigger porphyritic olivine chondrules with diameter up to 1.5 mm rarely occur.

The chemical composition of olivine crystals (Fa 18 mol%) and pyroxene crystals (Fs 16.2 mol%) proves this meteorite to be an H chondrite (Tab. 1, Fig. 4–5, App. 1–2). The averaged concentration of major elements in the classified meteorite is comparable to their mean content in H chondrites (Fig. 8). The meteorite NWA 11778 contains only slightly less Mg and Al than average H chondrites (Tab. 2). Among the other analysed elements, values distinctly out of the range of typical concentrations for H chondrites are characteristic of Hg and Eu (lower concentration in the NWA 11778 meteorite) (Tab. 3, Fig. 8–9).

The presence of chondrules with predominantly sharp boundaries (Fig. 2), secondary feldspar crystals with sizes of up to 50  $\mu\text{m}$ , chiefly crystalline mesostasis and only secondarily – devitrified glass in chondrules, and transparent crystalline matrix (with olivine crystals up to 0.26 mm and pyroxenes up to 0.30 mm in size), as well as common occurrence of untwinned rhombic pyroxenes prove the classified meteorite to belong to petrological type 5. It is additionally confirmed by mean Ni content in troilite below 0.5 wt% (0.04 wt%) (Tab. 1, App. 4) and carbon content below 0.2 wt% (0.07 wt%) (Tab. 2).

Undulatory extinction in some olivine and pyroxene crystals and the presence of irregular fractures in the NWA 11778 chondrite enables specifying its shock level as S2.

The weathering grade adopted for the NWA 11778 chondrite was W1, as visible weathering changes cover only the marginal parts of FeNi alloy grains. As a result of the weathering of

<sup>1</sup> Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnicztwa i Geologii, Laboratorium Nauk o Ziemi i Inżynierii Mineralnej, Wybrzeże S. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław; e-mail: Tadeusz.Przylibski@pwr.edu.pl

<sup>2</sup> Uniwersytet Wrocławski, Wydział Nauk o Ziemi i Kształtowania Środowiska, Instytut Nauk Geologicznych, Zakład Mineralogii i Petrologii, ul. W. Cybulskiego 30, 50-205 Wrocław

10–20% of FeNi grains, iron oxides and hydroxides are formed. These secondary weathering  $\text{Fe}^{3+}$  compounds also fill cracks, forming veins running between chondrules within matrix (Fig. 3).

**Keywords:** meteorite, ordinary chondrite, H5 chondrite, NWA chondrite, bulk chemistry, chemistry of minerals

## Wstęp

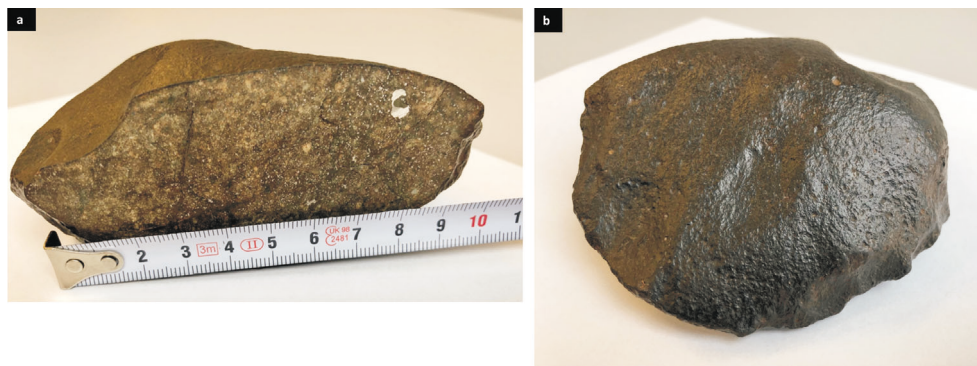
Autorzy sklasyfikowali nowy meteoryt znaleziony na pustyni Sahara w północno-zachodniej Afryce. Jest to kolejny chondryt sklasyfikowany we wrocławskim środowisku naukowym zajmującym się meteorytyką. Ponieważ jest to ostatni meteoryt, który badaliśmy wspólnie ze śp. Profesorem Ryszardem Kryzą, pragniemy szczególnie podkreślić wkład naukowy Profesora w polskie badania meteorytów i rozwój naszej krajowej meteorytyki. Bardzo dużo od Profesora nauczyliśmy się, jesteśmy dumni, że mogliśmy się od Niego uczyć, a ponieważ jest to już ostatnia nasza wspólna publikacja, to pragniemy w szczególny sposób wyróżnić wkład Profesora Kryzy w jej przygotowanie, zwłaszcza w badania składu chemicznego minerałów. Celem naszej pracy było przygotowanie kompletnej i przejrzystej publikacji, która może być swojego rodzaju wzorem opracowania badań służących dokładnemu sklasyfikowaniu, a jednocześnie rzetelnej charakterystyce mineralogiczno-petrologicznej typowego chondrytu zwyczajnego.

## Materiał i metody badań

Znaleziony na Saharze meteoryt zakupiony został przez Politechnikę Wrocławską, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii od marokańskiego dealera w Zagorze w czerwcu 2013 roku. Autorzy wykonali badania petrologiczne, mineralogiczne i geochemiczne niezbędne do sklasyfikowania meteorytu, a także do jego dokładniejszej charakterystyki. Badania petrograficzne wykonano w Laboratorium Geologii i Planetologii Zakładu Geologii i Wód Mineralnych na Wydziale Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej. Badania geochemiczne w zakresie składu chemicznego minerałów prowadzono w Zakładzie Mineralogii i Petrologii w Instytucie Nauk Geologicznych Uniwersytetu Wrocławskiego w oparciu o wyniki analiz chemicznych w mikroobszarze przeprowadzonych na mikrosondzie elektronowej w Ruhr-Universität Bochum, Faculty of Geosciences, Institute of Geology, Mineralogy and Geophysics, Electron Microprobe Laboratory oraz w Laboratorium Geologii i Planetologii Zakładu Geologii i Wód Mineralnych na Wydziale Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej. W tym ostatnim laboratorium prowadzono także badania uśrednionego składu chemicznego meteorytu (*bulk chemistry*) w oparciu o wyniki analiz chemicznych wykonanych metodą ICP-MS oraz ICP-ES dla Ni (ze względu na jego zawartość przekraczającą limit detekcji dla metody ICP-MS) przez Laboratorium ACME w Kanadzie. Do badań petrologicznych wykorzystano mikroskop petrograficzny Nikon Eclipse LV100PL wyposażony w kamerę cyfrową umożliwiającą rejestrację obrazów preparatów w świetle przechodzącym spolaryzowanym, a także

w świetle odbitym. Do badań składu chemicznego minerałów zastosowano mikrosondę elektronową Cameca SX Five FE.

Badany meteoryt to pojedynczy okaz o wadze 767,5 g z częściowo zachowaną skorupą obtopieniową o barwie czarnej z odcieniem brązowym (rys. 1). Główna masa meteorytu znajduje się w kolekcji Wydziału Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej. Holotyp (specimen) tego meteorytu o masie 35,7 g znajduje się w Muzeum Wydziału Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego pod numerem katalogowym WNoZ/Mt/46. Z okazu stanowiącego masę główną autorzy odcieśli do badań fragment o masie 120 g używając piły Polandmet Silver Blade VI z tarczą diamentową o średnicy 0,3 mm chłodzoną wodą. Następnie wykonano cztery płytki cienkie, z których dwie nakryto szkiełkiem i przeznaczono do badań mikroskopowych w świetle spolaryzowanym przechodzącym, a dwie pozostałe pozostawiono odkryte. Przeznaczono je do badań petrologicznych zarówno w świetle spolaryzowanym przechodzącym, jak i w świetle odbitym, a następnie po napyleniu węglem także do badań geochemicznych (składu chemicznego minerałów) na mikrosondzie elektronowej. Przygotowana została również próbka proszkowa o masie 16,5 g do badań uśrednionego składu chemicznego skały (*bulk chemical composition*) przy zastosowaniu metody ICP-MS. Próbkę tę przygotowano po wstępnym skruszeniu na kruszarce szczękowej firmy Retsch BB51. Elementy cierne kruszarki wykonane były z tlenku cyrkonu. Następnie zmielono materiał używając młynka kulowego PM100 firmy Retsch. Elementy cierne młynka wykonano z tlenku glinu. Z tego względu zmierzona koncentracja Zr nie może być przedmiotem analizy, gdyż jego zawartość może być efektem zanieczyszczenia próbki przez materiał cierny, z jakiego wykonano elementy kruszarki. Ponadto w przygotowywanych w ten sposób próbkach meteorytów odnotowano podwyższone koncentracje Zr (zgodnie z oczekiwaniami) oraz Hf, Y i Sc, będące najprawdopodobniej także skutkiem zanieczyszczenia podczas kruszenia.

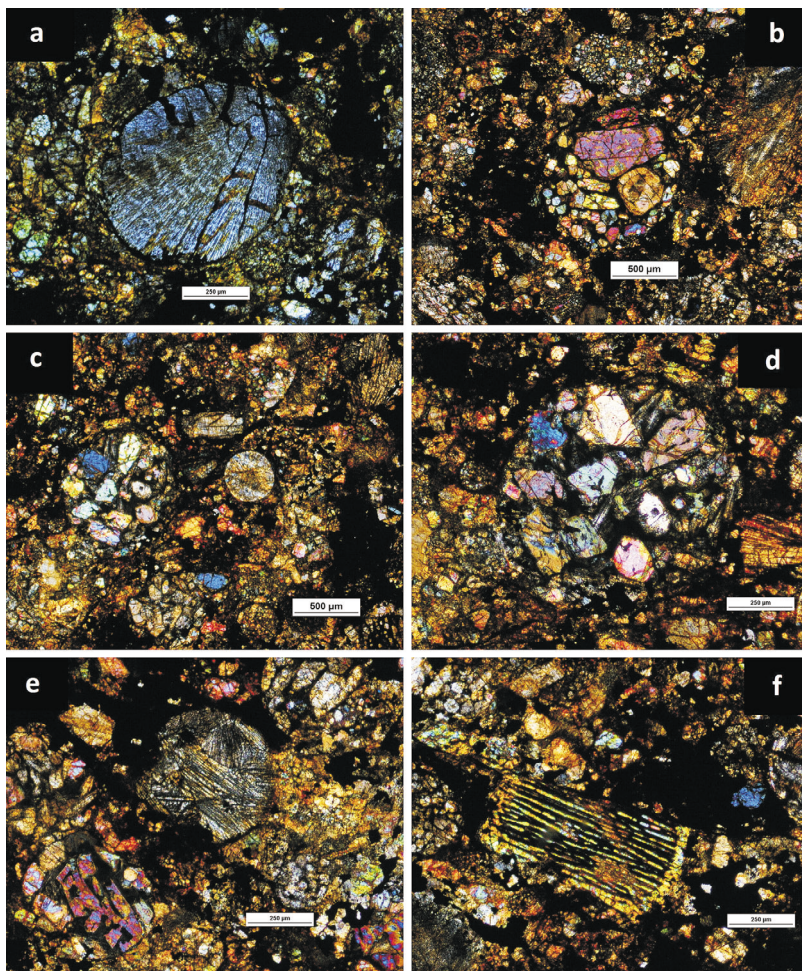


**Rys. 1.** Wnętrze meteorytu NWA 11778 (a) oraz zewnętrzna część chondrytu pokryta skorupą obtopieniową (b).

**Fig. 1.** Interior of NWA 11778 meteorite (a) and its outer part covered by fusion crust (b).

## Wyniki badań petrologicznych

Najbardziej charakterystycznym składnikiem badanego chondrytu są chondry. Stanowią one około 75% objętości meteorytu. Wielkość chondr waha się w granicach 0,2–1,2 mm, a średnia wynosi około 0,6 mm. Sporadycznie występują większe chondry porfirowe oliwinowe, których średnica dochodzi do 1,5 mm. Autorzy wśród chondr zidentyfikowali ich następujące typy: BO (belkowe oliwinowe), PO (porfirowe oliwinowe), których jest najwięcej, GO (ziarniste oliwinowe), RP (promieniste piroksenowe), POP (porfirowe oliwinowo-piroksenowe) oraz C



**Rys. 2.** Elementy strukturalne chondrytu NWA 11778 w świetle przechodzącym spolaryzowanym (skrzyżowane nikole): (a) chondra promienista piroksenowa, (b) duża chondra porfirowa oliwinowa, a nad nią mniejsza ziarnista oliwinowa, (c) i (d) chondry porfirowe oliwinowe, (e) chondra porfirowa piroksenowa, (f) fragment chondry belkowej oliwinowej wraz z dobrze widoczną obwódką.

**Fig. 2.** Structural components of NWA 11778 chondrite in transmitted polarized light (crossed polars): (a) radial pyroxene chondrule, (b) large porphyritic olivine chondrule with smaller granular olivine chondrule above, (c) and (d) porphyritic olivine chondrules, (e) porphyritic pyroxene chondrule, (f) fragment of barred olivine chondrule with well-defined rim.

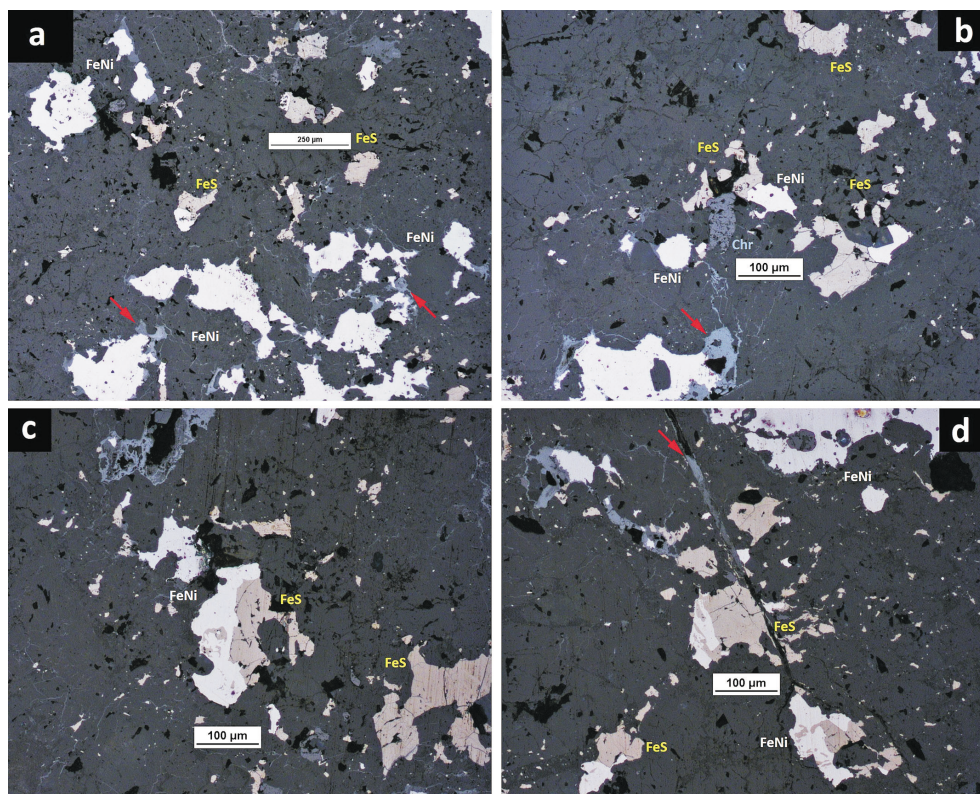
(skrytokrystaliczne). Chondry zwykle są łatwe do zidentyfikowania, posiadają wyraźnie widoczne, ostre granice. Tylko część chondr ma granice trudniejsze do zaobserwowania, z bardziej płynnym przejściem do matrix (rys. 2). Wskazuje to na typ petrograficzny 4 lub 5. Na szczególną uwagę zasługuje jedna chondra złożona, której średnica wynosi aż 6,7 mm. Jest ona złożona z połączonych kilku chondr BO oraz POP. Spotykane są także mniejsze chondry złożone, zwykle z dwóch fragmentów stanowiących odrębne chondry. Mezostazis w chondrach rzadko jest szkliste, zwykle szkliwo jest zdewitryfikowane. Kosztem szkliwa rekrytalizują bardzo drobne kryształy oliwinu. Często chondry skrytokrystaliczne posiadają wyraźną oliwinową obwódkę, której średnica zmienia się w granicach 0,32–0,56 mm. Stwierdzono także dość powszechne występowanie fragmentów chondr, zwłaszcza skrytokrystalicznych.

Matrix stanowi około 5% objętości meteorytu. Jest ono drobnokrystaliczne i przezroczyste. W matrix dominują kryształy oliwinów o wielkości od 0,03 mm do 0,26 mm, a podrzędnie występują także kryształy piroksenów o wielkości od 0,09 mm do 0,30 mm. Około 25% kryształów piroksenów nisko wapniowych jest zbliżniaczonych, a część z nich wykazuje skośne wygaszanie światła. Autorzy nie stwierdzili obecności większych kryształów skaleni. Niewielkie kryształy skalenia stwierdzono tylko w obrazie BSE (elektronów wstecznie rozproszonych). Obserwacje te potwierdzają, że badany chondryt należy do typu petrograficznego 4 lub 5. W skład matrix wchodzi natomiast również ziarna minerałów nieprzezroczystych. Kryształy oliwinu są mocno spękanе, ale tylko nieliczne spośród nich i w nieznacznym stopniu wykazują faliste wygaszanie światła. Również niektóre kryształy piroksenu faliście wygaszają światło. Wskazuje to na niski stopień szokowy – S2. Sporadycznie występują także kryształy apatytu. W obrębie matrix występują także spękania wypełnione nieprzezroczystymi tlenkami i wodorotlenkami żelaza. Spękania te mają charakter kataklastyczny – nie przecinają chondr, przechodzą na granicy kryształów matrix i chondr.

Minerały nieprzezroczyste stanowią około 20% objętości analizowanego chondrytu. Autorzy zidentyfikowali ziarna stopu FeNi – kamacyt i taenit, jak również ziarna troilitu (FeS) (rys. 3). Wśród tych minerałów zdecydowanie ilościowo dominuje kamacyt, a podrzędnie występuje troilit. Widoczne są również zrosty ziaren FeNi z ziarnami FeS, a także odmieszane ziarna troilitu w kamacycie (rys. 3c i 3d). Rzadko występują także kryształy chromitu (rys. 3b). Największe ziarna FeNi mają średnicę dochodzącą do 0,6 mm. Zdecydowanie mniejsze są ziarna troilitu, których średnica dochodzi do 0,12 mm. Kryształy chromitu mają natomiast rozmiary w granicach 0,02–0,04 mm. Jedynie ziarna kamacytu wykazują ślady procesów wietrzeniowych na krawędziach, które wskutek utlenienia przeobrażają się w tlenki i wodorotlenki żelaza. Wykazują one często charakterystyczne dla hematytu czerwono-wiśniowe zabarwienie. Natomiast ziarna troilitu nie są utlenione (rys. 3). Na tej podstawie można ocenić stopień wietrzenia chondrytu na W1.

W obrębie chondr ziarna FeNi są bardzo rzadkie i mają bardzo małe rozmiary, rzędu 0,01–0,05 mm.





**Rys. 3.** Minerale nieprzezroczyste chondrytu NWA 11778 w świetle odbitym. FeNi – ziarna metalu (kamacyt i taenit), FeS – troilit, Chr – chromit ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ). Strzałkami oznaczono (a) i (b) zwięzłe strefy zewnętrzne ziaren metalu, w których stop FeNi został zastąpiony przez wtórne tlenki i wodorotlenki żelaza, (d) spękanie wypełnione wtórnymi tlenkami i wodorotlenkami żelaza. W centralnej części zdjęć (c) i (d) widoczne są ziarna FeS w asocjacji z FeNi oraz robaczkowe przerosty FeS w ziarnach metalu.

**Fig. 3.** Opaque minerals of NWA 11778 chondrite in reflected light. FeNi – metallic grains (kamacite and taenite), FeS – troilite, Chr – chromite ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ). Arrows indicate (a) and (b) weathered outer zones of metallic grains, in which FeNi alloy were replaced by secondary iron oxides and hydroxides, (d) crack filled with secondary iron oxides and hydroxides. In the central part of microphotography (c) and (d) FeS grains in association with FeNi are visible as well as FeS intergrown in metallic grains.

## Wyniki badań geochemicznych

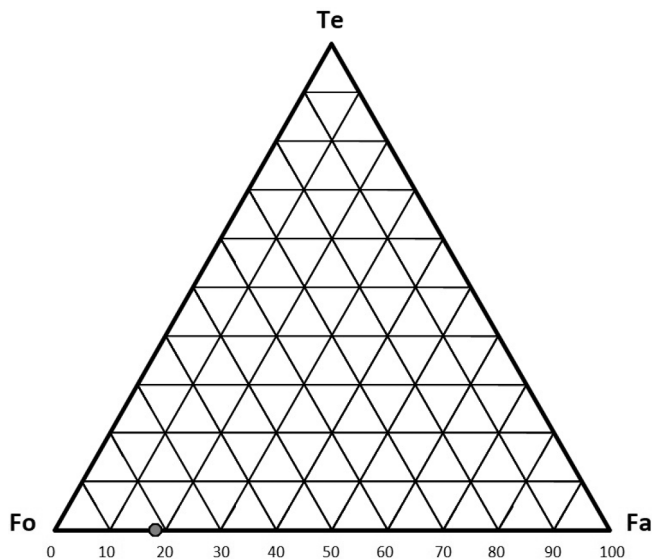
### Skład chemiczny minerałów

Średni skład chemiczny minerałów chondrytu NWA 11778 przedstawiono w tabeli 1. Skład molowy oliwinu (18,0% mol. Fa) wskazuje jednoznacznie, że chondryt ten należy do grupy H chondrytów zwyczajnych, dla których zawartość fajalitu (Fa) zawiera się w granicach 16–20% mol. (Hutchison 2006), a średnia zawartość wynosi 18,8% mol. (Grady i in. 2014). Również skład molowy piroksenów niskowapniowych, w których ferrosilit (Fs) stanowi średnio 16,2% mol., wskazuje, że chondryt NWA 11778 należy do grupy H chondrytów zwyczajnych, w których jego molowa zawartość wynosi od 14,5% mol. do 18% mol. (Hutchison 2006).

Skład chemiczny oliwinu wskazuje, że w chondrycie NWA 11778 występuje typowy chryzolit (oliwin właściwy) (rys. 4). Według chemicznej klasyfikacji piroksenów kryształy niskowapniowego piroksenu reprezentuje bronzyt. Natomiast piroksen wysokowapniowy to diopsyd (rys. 5). Plagioklaz obecny w chondrycie NWA 11778 reprezentowany jest przez kryształy oligoklazu (tab. 1, rys. 6). Wyniki szczegółowych analiz składu chemicznego minerałów przedstawiono w załączonych tabelach (zał. 1–5).

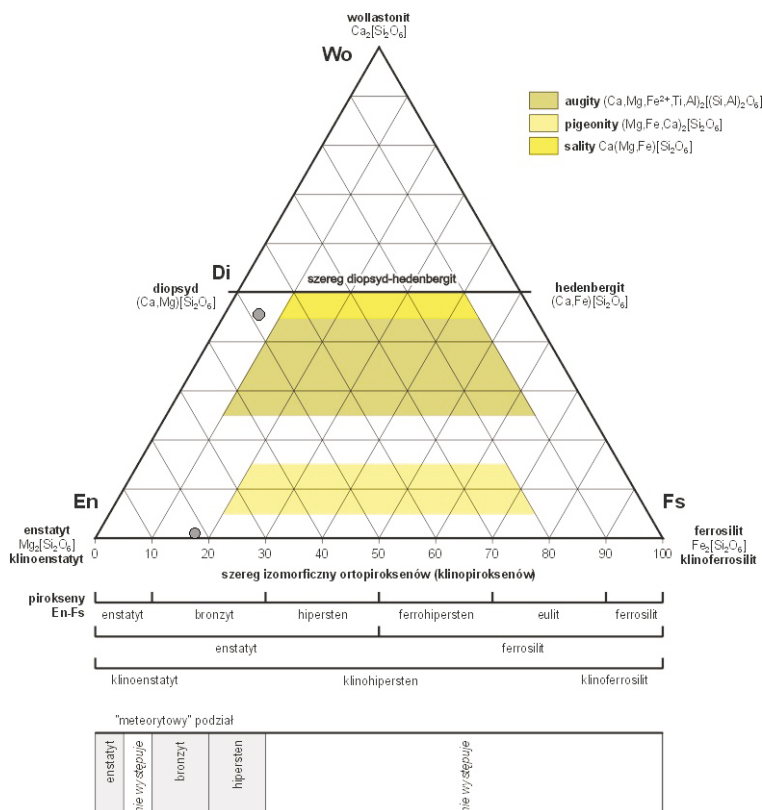
Taenit zawiera średnio 46,56% wag. Ni, natomiast kamacyt zawiera średnio 5,85% wag. Ni (tab. 1, rys. 7). Zawartość Ni w ziarnach troilitu jest bardzo mała i wynosi średnio 0,04% wag. (tab. 1). Na wykresie przedstawiającym zawartość Fe i Ni w ziarnach stopu FeNi (rys. 7) wyraźnie widoczna jest grupa punktów reprezentująca wyniki analiz ziaren FeNi, w których ponad 48% wag. stanowi Ni. Ziarna te mogą reprezentować tetrataenit (zawierający 48–57% Ni zgodnie z pracą Clarke i Scott 1980), aczkolwiek autorzy nie dysponują danymi o strukturze tych ziaren, które mogłyby potwierdzić tę tezę.

Stwierdzono również obecność niewielkich ziaren chromitu. Wykonano analizy chemiczne dwóch różnych ziaren. Ich skład znacząco różni się zawartością Fe (zarówno  $\text{Fe}^{2+}$ , jak i  $\text{Fe}^{3+}$ ) oraz Mg. Wzory chemiczne tych ziaren przedstawiają się następująco:



**Rys. 4.** Trójkąt klasyfikacyjny oliwinów (Fa – fajalit, Fo – forsteryt, Te – tefroit) z zaznaczonym składem kryształów oliwinu występujących w chondrycie NWA 11778 w polu chryzolit (oliwinu właściwego charakteryzującego się zawartością 10–30% mol. fajalitu).

**Fig. 4.** Ternary diagram for Fa-Fo-Te molar content of olivine crystals showing composition of olivine of NWA 11778 chondrite in the field of chrysolite (olivine characterized by 10–30% mol of Fa).



**Rys. 5.** Trójkąt klasyfikacyjny piroksenów (<http://www.woreczko.pl/>, 2020) z zaznaczonym składem piroksenów niskowapniowych reprezentowanych w chondrycie NWA 11778 przez kryształy bronzytu oraz wynikiem pojedynczej analizy wysokowapniowego piroksenu, którego skład chemiczny odpowiada diopsydowi.

**Fig. 5.** Ternary diagram for Fs-Wo-En molar content of pyroxene crystals (<http://www.woreczko.pl/>, 2020) of NWA 11778 chondrite showing both Ca-poor pyroxene (bronzite) and single analysis of Ca-rich diopside.

**Tabela 1.** Średni skład chemiczny minerałów chondrytu NWA 11778; Fo, Fa, Te, En, Fs, Wo, Ab, An, Or w procentach molowych; Fe, Ni, S w procentach wagowych.

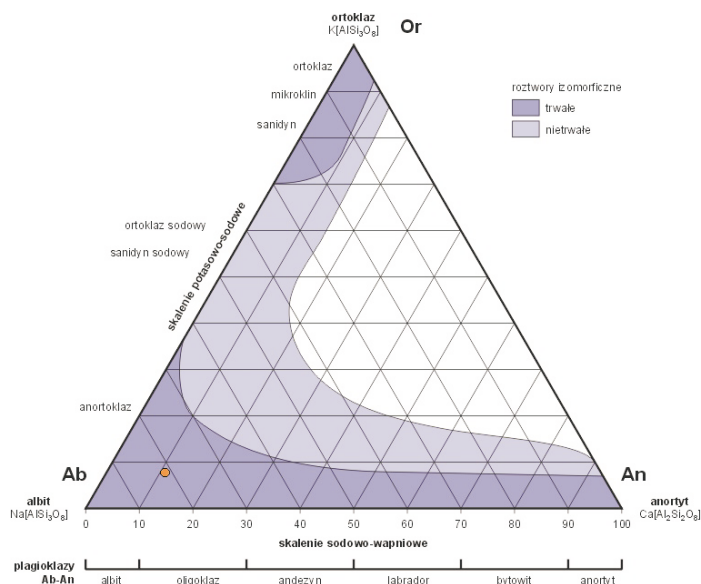
**Table 1.** Average chemical composition of minerals of NWA 11778 chondrite. Fo, Fa, Te, En, Fs, Wo, Ab, An, Or in mol%; Fe, Ni, S in wt%.

minerał	oliwin	low-Ca Px	high-Ca Px	plagioklaz	kamacyt	taenit	troilit
skład chemiczny	Fo 81,35	En 82,71	En 48,00	Ab 82,22	Fe 92,98	Fe 54,30	Fe 62,44
	Fa 18,03	Fs 16,17	Fs 5,80	An 11,44	Ni 5,85	Ni 46,56	S 37,07
	Te 0,41	Wo 1,12	Wo 46,20	Or 6,33			Ni 0,04

## Skład chemiczny skały

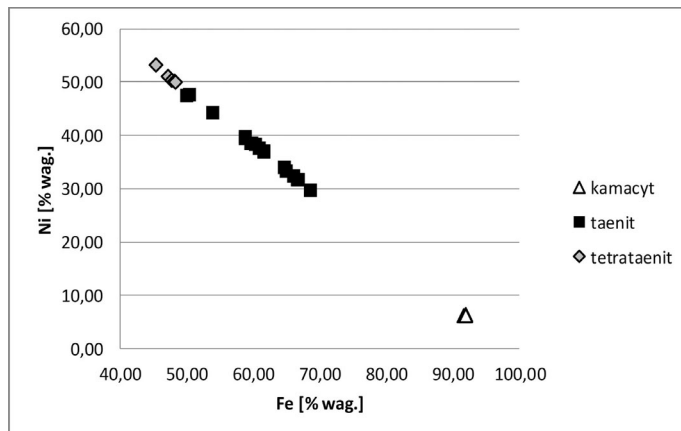
Wyniki analiz składu chemicznego skały przedstawione zostały jako zawartości poszczególnych pierwiastków w chondrycie NWA 11778, a także jako wartość stosunków atomowych wybranych pierwiastków. Taki sposób prezentacji wyników





**Rys. 6.** Trójkąt klasyfikacyjny skaleni (<http://www.woreczko.pl/>, 2020) z zaznaczonym wynikiem pojedynczej analizy składu chemicznego ziarna skalenia reprezentowanego w chondrycie NWA 11778 przez oligoklaz (10–30% mol. An) z niewielką domieszką członu ortoklazowego.

**Fig. 6.** Ternary diagram for An-Or-Ab molar content of feldspar (<http://www.woreczko.pl/>, 2020) showing single analysis of oligoclase (10–30% mol. An) crystals with low admixture of Or in NWA 11778 chondrite.



**Rys. 7.** Wykres zawartości Fe i Ni [% wag.] w ziarnach stopu FeNi. Wyraźnie zaznacza się obecność zarówno kamacytu, jak i taenitu oraz prawdopodobnie tetrataenitu.

**Fig. 7.** Abundance of Fe and Ni in analyzed FeNi alloy grains clearly showing kamacite, taenite and most probably also tetrataenite section (in wt%).

analiz chemicznych pozwala na odniesienie uzyskanych wartości do wartości charakterystycznych dla każdej z grup chondrytów zwyczajnych. Dzięki temu można nie tylko dokonać analizy zawartości poszczególnych pierwiastków w chondrycie NWA 11778, ale także ocenić jak bardzo te wartości różnią się od wartości typowych dla poszczególnych grup chondrytów zwyczajnych. Taka charakterystyka

pozwała również określić charakterystyczne, indywidualne cechy składu chemicznego chondrytu NWA 11778. Zawartość wybranych pierwiastków i stosunków atomowych wybranych pierwiastków wchodzących w skład meteorytu NWA 11778 w odniesieniu do średnich wartości charakterystycznych dla chondrytów zwyczajnych i chondrytów węglistych CI przedstawiono w tabeli 2. Natomiast tabela 3 przedstawia zawartości wybranych pierwiastków w chondrycie NWA 11778 w odniesieniu do ich średniej zawartości oraz zakresu zawartości w chondrytach zwyczajnych grupy H.

**Tabela 2.** Zawartość wybranych pierwiastków [% wag.] i stosunków atomowych wybranych pierwiastków wchodzących w skład meteorytu NWA 11778 w odniesieniu do średnich wartości charakterystycznych dla chondrytów zwyczajnych i chondrytów węglistych CI (według Hutchison'a 2006).

**Table 2.** Abundance of selected elements [wt%] and atomic ratios of selected elements composed NWA 11778 meteorite in comparison with average abundances typical for ordinary chondrites and CI chondrites (according to Hutchison 2006).

Pierwiastek	Chondryty				
	H	L	LL	NWA 11778	CI
Si	16,9	18,5	18,9	15,69	10,5
Ti	0,06	0,063	0,062	0,05	0,042
Al	1,13	1,22	1,19	0,99	0,86
Cr	0,366	0,388	0,374	0,34	0,265
Fe	27,5	21,5	18,5	29,74	18,2
Mn	0,232	0,257	0,262	0,22	0,19
Mg	14	14,9	15,3	12,42	9,7
Ca	1,25	1,31	1,3	1,19	0,92
Na	0,64	0,7	0,7	0,55	0,49
K	0,078	0,083	0,079	0,07	0,056
P	0,108	0,095	0,085	0,12	0,102
Ni	1,6	1,2	1,02	1,81	1,07
Co	0,081	0,059	0,049	0,096	0,051
S	2,0	2,2	2,3	2,04	5,9
C	0,11	0,09	0,12	0,07	3,2
Au [ppb]	215	162	140	207,3	144
Atomic ratios	H	L	LL	NWA 11778	CI
Mg/Si	0,957	0,931	0,935	0,915	1,068
Al/Si · 10 <sup>4</sup>	696	686	655	657	853
Ca/Si · 10 <sup>4</sup>	518	496	482	531	614
Fe/Si · 10 <sup>4</sup>	8184	5845	4923	9533	8717
Ca/Al	0,74	0,72	0,74	0,81	0,72
Ni/Si · 10 <sup>4</sup>	453	310	258	552	488
CI normalized atomic ratio	H	L	LL	NWA 11778	CI
Mg/Si	0,9	0,87	0,88	0,86	1
Al/Si	0,82	0,81	0,77	0,77	1
Fe/Si	0,94	0,67	0,56	1,09	1

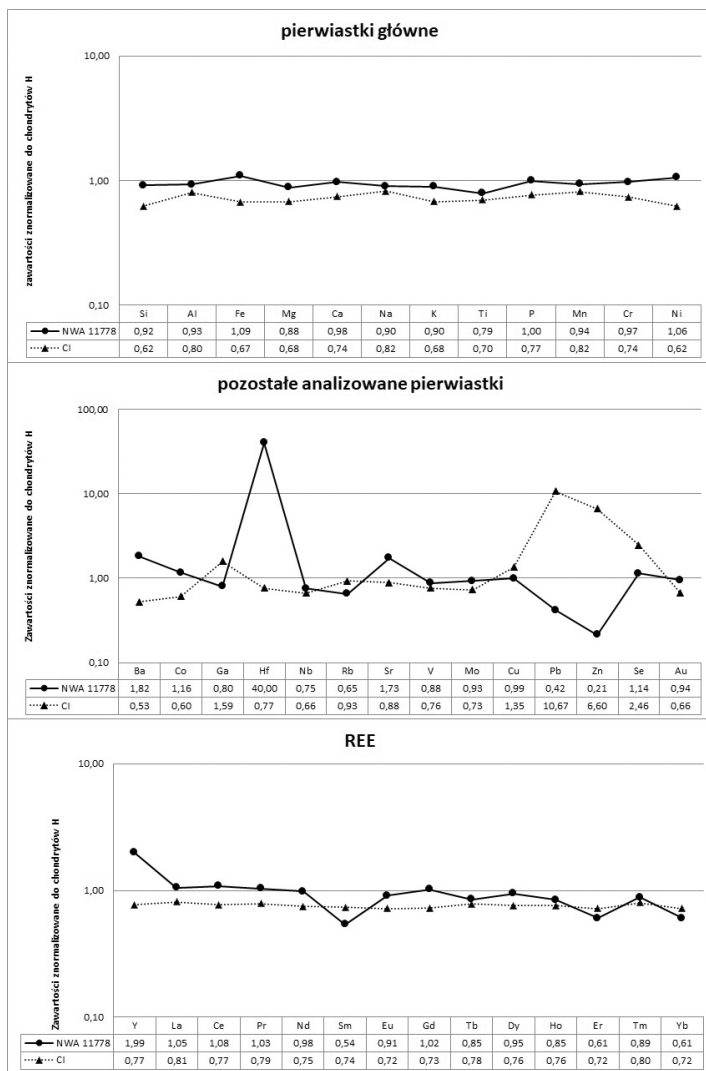
**Tabela 3.** Zawartość wybranych pierwiastków [ppm] w chondrycie NWA 11778 w odniesieniu do ich średniej zawartości (według McSween i Huss 2010) oraz zakresu zawartości w chondrytach H (według Koblitz 2010).

**Table 3.** Abundance of selected elements [ppm] in NWA 11778 chondrite in comparison with its average abundance (McSween and Huss 2010) and range of its abundance in H chondrites (Koblitz 2010).

pierwia- stek	NWA 11778	średnia H	zakres H	pierwia- stek	NWA 11778	średnia H	zakres H
Si	156 900	171 000	82 000–235 000	Pb	0,1	0,24	0,008–2,28
Al	9900	10 600	690–11 100	Zn	10	47	0,54–540
Fe	297 400	272 000	42 000–912 000	As	0,7	2,2	0,078–15,1
Mg	124 200	141 000	4600–213 000	Cd	<0,1	<0,01	0,000038–1,24
Ca	11 900	12 200	4100–127 000	Sb	<0,1	0,066	0,0015–0,78
Na	5500	6110	40–29 400	Bi	<0,1	<0,01	0,00016–0,907
K	700	780	100–4700	Ag	<0,1	0,045	0,0032–1,87
Ti	500	630	100–4700	Hg	<0,01	bd	0,19–1,93
P	1200	1200	100–2400	Tl	<0,1	<0,001	0,00004–0,361
Mn	2200	2340	30–5800	Se	9,1	8	0,56–42,5
Cr	3400	3500	30–37 100	Zr	253,4	7,3	3,09–10,00
Ni	18 100	17 100	100–130 000	Au	0,2073	0,22	0,00213–1,8
Ba	8	4,4	0,13–26,50	Sc	15	7,8	0,04–13,8
Be	<1	0,03	0,03–0,39	Y	15,7	2	0,74–6,80
Co	961,2	830	25,20–5 000,00	La	0,6	0,301	0,087–7,68
Cs	<0,1	<0,2	0,001–2,16	Ce	0,8	0,763	0,45–13,8
Ga	4,8	6	0,58–37,30	Pr	0,13	0,12	0,05–0,4
Hf	6	0,15	0,10–0,38	Nd	0,6	0,581	0,24–1,22
Nb	0,3	0,4	0,20–0,46	Sm	0,19	0,194	0,068–0,73
Rb	1,5	2,3	0,51–86,80	Eu	0,04	0,074	0,055–0,15
Sn	<1	0,350	0,103–2,3	Gd	0,25	0,275	0,1–0,457
Sr	15,2	8,8	8,00–938,00	Tb	0,05	0,049	0,02–0,091
Ta	<0,1	0,021	0,02–0,05	Dy	0,26	0,305	0,12–0,568
Th	<0,2	0,038	0,02–0,285	Ho	0,07	0,074	0,03–0,12
U	<0,1	0,013	0,01–2,44	Er	0,18	0,213	0,07–0,592
V	64	73	2,30–91,10	Tm	0,02	0,033	0,01–0,045
W	<0,5	0,164	0,16–0,87	Yb	0,18	0,203	0,03–0,345
Mo	1,3	1,4	1,24–4,88	Lu	0,02	0,033	0,008–0,068
Cu	93,5	94	48–759				

Kursywą oznaczono pierwiastki, których podwyższona zawartość wynika zapewne z domieszki materiału ciernego kruszarki użytej do przygotowania próbki do analiz ICP-MS.

Skład chemiczny chondrytu NWA 11778 przedstawiony jako zawartość wybranych pierwiastków oraz stosunków atomowych w tabeli 2 nie jest w pełni zgodny ze składem chemicznym chondrytów należących do grupy H. Niemniej jednak pierwiastki występujące w największych ilościach, takie jak: Si, Fe, Mg, S, Ni, ale także Co i Au charakteryzują się zawartościami najbardziej zbliżonymi do charakterystycznych wartości dla chondrytów zwyczajnych grupy H. Nieco mniejszą zbieżność z charakterystycznymi zawartościami w chondrytach H wykazują także: Ca, Cr, Mn, Na i P (tab. 2).

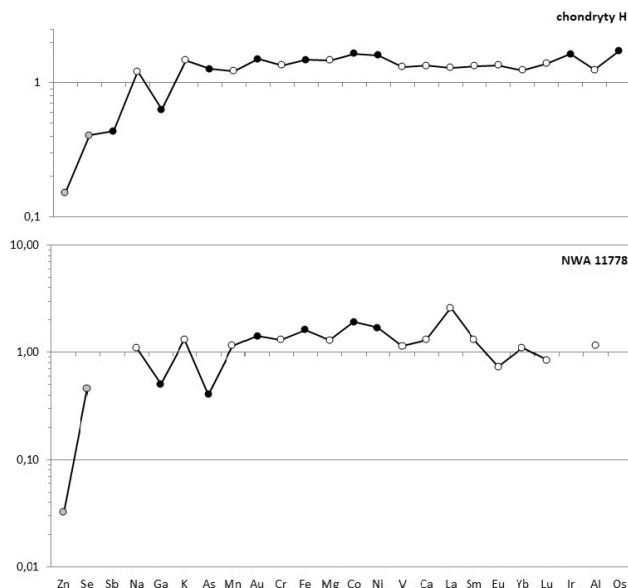


**Rys. 8.** Zawartość analizowanych pierwiastków w chondrycie NWA 11778 znormalizowana do ich zawartości w chondrytach H w porównaniu z zawartością tych pierwiastków w chondrytach CI (za McSween i Huss 2010).

**Fig. 8.** Abundance of analyzed elements in NWA 11778 chondrite normalized to H chondrites in comparison with abundance of these elements in CI chondrites (according to McSween and Huss 2010).

Analizując różne stosunki atomowe pierwiastków takich, jak Fe i Si oraz Ca otrzymujemy wartości charakterystyczne dla chondrytów grupy H. Natomiast uwzględniając różne stosunki atomowe Al i Mg otrzymane wartości są bliższe chondrytom grupy L oraz LL. Oznacza to, że badany przez autorów chondryt NWA 11778 jest niecoubożony w Mg i Al w stosunku do średniego składu chondrytów grupy H (tab. 2).

Analizując przedstawioną w tabeli 3 zawartość wybranych pierwiastków w chondrycie NWA 11778 w odniesieniu do ich średniej zawartości oraz zakresu zawartości w chondrytach H należy stwierdzić, że zawartości niemal wszystkich pierwiastków mieszczą się w zakresie charakterystycznym dla chondrytów grupy H. Wiele z tych pierwiastków występuje w zawartości bliskiej średniej zawartości w chondrytach grupy H. Wśród nich są: P, Mn, Cr, Mo, Cu, Au oraz w dalszej kolejności także: Fe, Si, Al, Mg, Ca, Na, K, Ti, Ni, V, Se oraz niemal wszystkie pierwiastki ziem rzadkich (rys. 8–9). Wartościami odstającymi wyraźnie poza zakres zawartości charakterystycznych dla chondrytów grupy H charakteryzują się: Hg i Eu (zbyt mała zawartość) oraz Hf, Zr, Sc i Y (zbyt duża zawartość). Przyczyny anomalnych zawartości rtęci i europu pozostają niewyjaśnione. Być może są one związane z procesem ziemskiego wietrzenia meteorytu na pustyni. Natomiast wyraźnie zbyt duża zawartość Zr oraz Hf, Sc i Y spowodowana jest najprawdopodobniej domieszką materiału ciernego kruszarki użytej do przygotowania próbki do analiz ICP-MS.



**Rys. 9.** Zawartość pierwiastków litofilnych (biały symbol), syderofilnych (czarny symbol) i chalkofilnych (szary symbol) chondrytu NWA 11778 znormalizowana do ich zawartości w chondrytach CI w porównaniu z zawartością tych pierwiastków w chondrytach grupy H (McSween i Huss 2010).

**Fig. 9.** Abundance of lithophile (white symbol), siderophile (black symbol) and chalcophile (gray symbol) elements of NWA 11778 chondrite normalized to its abundance in CI chondrites in comparison with abundance of these elements in H chondrites (McSween and Huss 2010).



## Klasyfikacja

Obecność chondr, jak i skład mineralny meteorytu zdominowany przez oliwin oraz nisko- i wysokowapniowe pirokseny, z obecnością ziaren stopu FeNi w postaci kamacytu i taenitu, a także obecność troilitu, którym towarzyszą nieliczne kryształy skalenia, chromitu i apatytu nie pozostawiają wątpliwości co do jego przynależności do klasy chondrytów zwyczajnych.

O jego przynależności do grupy H decyduje przede wszystkim skład chemiczny kryształów oliwinu (Fa 18,0% mol.), co potwierdza również skład chemiczny kryształów piroksenów niskowapniowych (Fs 16,2% mol.). Niemniej jednak uśredniony skład chemiczny skały nie pokrywa się całkowicie ze średnim składem chondrytów H. Jednak pierwiastki występujące w chondrycie NWA 11778 w największej ilości charakteryzuje zawartość zbliżona do średniej ich zawartości w chondrytach H lub mieszcząca się w zakresie charakterystycznym dla tej grupy chondrytów. Największe odstępstwa od zawartości typowej dla chondrytów grupy H wykazują Mg i Al. Meteoryt NWA 11778 jest w te pierwiastki nieco zubożony względem wartości notowanych w chondrytach grupy H.

O zaklasyfikowaniu chondrytu NWA 11778 do typu petrograficznego 5 decyduje przede wszystkim:

- obecność wyraźnie widocznych chondr o przeważnie ostrych granicach,
- obecność nielicznych wtórnych kryształów skaleni o wielkości nie przekraczającej 50  $\mu\text{m}$ ,
- obecność w dużym stopniu wykrystalizowanych faz mineralnych (oliwinów) w obrębie chondr (krystaliczne mezostazis), obecność chondr z mętnym, zdewitryfikowanym szkliwem,
- obecność przezroczystego, krystalicznego matrix, w którym średnice kryształów oliwinów dochodzą do 0,26 mm, a kryształy piroksenów osiągają średnice dochodzące do 0,30 mm,
- występowanie przede wszystkim piroksenów rombów, z niewielkim udziałem kryształów zbliźniaczonych (do 25%), z których tylko niewielką część stanowią pirokseny jednoskośne,
- średnia zawartość Ni w troilicie poniżej 0,5% wag. (0,04% wag.),
- zawartość węgla mniejsza od 0,2% wag. (0,07% wag.).

Niewielkimi odstępstwami od cech diagnostycznych, jakie powinny charakteryzować typ petrograficzny 5 (Van Schmus i Wood 1967) jest obecność chondr ze zdewitryfikowanym mezostazis (typ 4) oraz występowanie jednoskośnych i zbliźniaczonych kryształów piroksenów także charakterystyczne dla typu petrograficznego 4.

Faliste wygaszanie światła przez niektóre kryształy oliwinów i piroksenów oraz obecność nieregularnych spękań w chondrycie NWA 11778 pozwala określić jego stopień szokowy jako S2 (Stöffler i in. 1991). Oznacza to meteoryt (jego skałę macierzystą) bardzo słabo zszokowany. Takie skały doświadczyły oddziaływania ciśnienia szokowego rzędu 5–10 GPa. Wobec braku struktur planarnych meteoryt

ten był zapewne poddany ciśnieniom zderzeniowym bliższym dolnej granicy podanego przedziału ciśnienia szokowego (Hutchison 2006).

Stopień wietrzenia chondrytu NWA 11778 autorzy ustalili na W1 na podstawie zarejestrowanych zmian wietrzeniowych jedynie w odniesieniu do ziaren stopu FeNi. Zmiany te obejmują tylko brzeżne partie ziaren (Wlotzka 1993). Kosztem wietrzenia około 10–20% ziaren FeNi powstają tlenki i wodorotlenki żelaza, z których część wykazuje barwę charakterystyczną dla hematytu ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Te wtórne, wietrzeniowe związki żelaza III zastępują zewnętrzne części ziaren stopu FeNi, jak również wypełniają spękania, tworząc żyłki biegnące w obrębie matrix, pomiędzy chondrami.

Ostatecznie meteoryt NWA 11778 należy sklasyfikować jako chondryt zwyczajny: H5, S2, W1.

Powyższą propozycję klasyfikacji autorzy zgłosili do the Nomenclature Committee of the Meteoritical Society, przy czym roboczo użyli nazwy NWA XXX\_1. W dniu 24.07.2018. autorzy otrzymali informację, że zaaprobowana została proponowana klasyfikacja, a meteoryt otrzymał oficjalną nazwę Northwest Africa 11778, w skrócie NWA 11778. W tym samym dniu decyzję tę udostępniono publicznie i od tej pory chondryt zwyczajny NWA 11778 figuruje w bazie danych the Meteoritical Bulletin jako H5, S2, W1.

## Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań petrologicznych, mineralogicznych i geochemicznych autorzy sklasyfikowali badany meteoryt jako chondryt zwyczajny należący do grupy H, w typie petrograficznym 5. Stopień szokowy określono na S2, a stopień wietrzenia na W1. Ostatecznie meteoryt Northwest Africa 11778 sklasyfikowany jest oficjalnie jako H5, S2, W1 i figuruje w bazie danych the Meteoritical Bulletin jako 1 z 9763 sklasyfikowanych chondrytów H5. Przeprowadzone badania wykazały, że meteoryt NWA 11778 jest typowym chondrytem zwyczajnym, którego cechy petrograficzne, jak i skład mineralny oraz chemiczny nie odbiegają od pozostałych chondrytów sklasyfikowanych dotychczas w grupie H i typie petrograficznym 5.

## Podziękowania

Składamy szczególne podziękowania Śp. Profesorowi Ryszardowi Kryzie za praktyczny kurs mineralogii i petrologii, jaki stał się naszym udziałem poprzez wspólne z Nim badania meteorytów. Wspólne z Profesorem prace na mikrosondzie elektronowej długo w noc nie tylko zostaną w naszej pamięci, ale mamy nadzieję, że zaprocentują w naszych własnych badaniach na nowej mikrosondzie elektronowej w Laboratorium Nauk o Ziemi i Inżynierii Mineralnej Politechniki Wrocławskiej ku pożytkowi polskiej meteorytyki i jej młodych adeptów.

## Literatura

- Clarke R.S., Scott E.R.D., 1980, *Tetrataenite – ordered FeNi, a new mineral in meteorites*, American Mineralogist, 65, s. 624–630.
- Grady M.M., Pratesi G., Cecchi V.M., 2014, *Atlas of meteorites*, Cambridge University Press, UK.
- Hutchison R., 2006, *Meteorites. A Petrologic, Chemical and Isotopic Synthesis*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Koblitz J., 2010, MetBase®, ver. 7.3, Meteorite Data Retrieval Software, Ritterhude, Germany.
- McSween H.Y., Huss G.R., 2010, *Cosmochemistry*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Stöffler D., Keil K., Scott E.R.D., 1991, *Shock metamorphism of ordinary chondrites*, Geochimica et Cosmochimica Acta, 55, s. 3845–3867.
- Van Schmus W.R., Wood J.A., 1967, *A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites*, Geochimica et Cosmochimica Acta, 31, s. 747–765.
- Wlotzka F., 1993, *A weathering scale for the ordinary chondrites*, Meteoritics, 28, s. 460.

## Źródła internetowe

<http://www.woreczko.pl/> [dostęp 17.02.2020]

## Załączniki

**Zał. 1.** Skład chemiczny kryształów oliwinu badanego okazu chondrytu NWA 11778. Wyniki w % wag. Wzory chemiczne w przeliczeniu na  $4O^{2-}$ .

**App. 1.** *Chemical composition of representative olivine crystals of NWA 11778 chondrite. Results in wt.%. Chemical formula calculated according to  $4O^{2-}$ .*

	ol#10	ol#14	ol#22	ol#29	ol#31	ol#33
SiO <sub>2</sub>	40,28	39,18	39,61	39,43	39,45	39,79
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,31	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
MgO	42,38	44,13	44,39	43,59	43,76	44,10
CaO	0,74	0,03	0,01	0,01	0,01	0,02
MnO	0,38	0,42	0,39	0,42	0,37	0,39
FeO	17,09	16,85	17,43	17,42	17,40	17,43
NiO	0,12	0,06	0,00	0,00	0,00	0,03
total	101,30	100,69	101,83	100,87	100,99	101,76
at%						
Si <sup>4+</sup>	1,008	0,987	0,988	0,993	0,992	0,993
Al <sup>3+</sup>	0,009	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
Mg <sup>2+</sup>	1,582	1,658	1,651	1,637	1,641	1,641
Ca <sup>2+</sup>	0,020	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
Mn <sup>2+</sup>	0,008	0,009	0,008	0,009	0,008	0,008
Fe <sup>2+</sup>	0,358	0,355	0,364	0,367	0,366	0,364
Ni <sup>2+</sup>	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001
total	2,987	3,012	3,011	3,006	3,007	3,007
O <sup>2-</sup>	4	4	4	4	4	4
Ca <sup>2+</sup> + Mg <sup>2+</sup> + Fe <sup>2+</sup> + Mn <sup>2+</sup> + Ni <sup>2+</sup> :						
	1,970	2,024	2,023	2,013	2,015	2,014
mol%						
Fo	80,30	81,92	81,61	81,32	81,44	81,48
Fa	18,17	17,54	17,99	18,23	18,16	18,07
Te	0,41	0,44	0,40	0,45	0,40	0,40

**Zař. 2.** Skład chemiczny kryształów piroksenów niskowapniowych (bronzytu) i wysokowapniowego (diopsydu) badanego okazu chondrytu NWA 11778. Wyniki w % wag. Wzory chemiczne w przeliczeniu na  $6O^{2-}$ .

**App. 2.** *Chemical composition of representative low-Ca pyroxene (bronzite) and high-Ca pyroxene (diopside) crystals of NWA 11778 chondrite. Results in wt.%. Chemical formula calculated according to  $6O^{2-}$ .*

	low-Ca Px (bronzyt)													Ca-rich Px (dio- psyd)
	px#2	px#4	px#5	px#6	px#7	px#8	px#13	px#23	px#24	px#28	px#32	px#34	px#25	
SiO <sub>2</sub>	55,80	55,48	56,23	55,52	55,56	55,82	55,78	56,42	56,22	56,91	56,19	56,02	53,10	
TiO <sub>2</sub>	0,16	0,24	0,09	0,20	0,17	0,24	0,24	0,39	0,27	0,23	0,28	0,38	0,17	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,19	0,22	0,13	0,26	0,75	0,37	0,19	0,40	0,44	0,26	0,29	0,68	0,42	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,08	0,12	0,10	0,49	0,08	0,10	0,04	0,17	0,21	0,10	0,19	0,41	0,70	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,20	3,67	2,72	3,25	2,39	2,30	2,30	1,40	1,19	0,42	1,66	0,96	1,21	
FeO	8,37	8,11	8,77	8,22	8,85	8,91	8,93	9,84	10,03	10,57	9,64	9,96	2,55	
MnO	0,46	0,44	0,42	0,42	0,42	0,43	0,41	0,45	0,42	0,48	0,46	0,43	0,09	
CaO	0,45	0,49	0,56	0,50	0,54	0,60	0,47	0,55	0,60	0,53	0,59	1,32	22,59	
MgO	32,20	32,15	32,17	32,12	31,71	31,75	31,95	31,85	31,51	31,65	31,74	30,98	16,87	
Na <sub>2</sub> O	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,05	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,42	
K <sub>2</sub> O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,00	0,02	0,01	0,01	0,02	0,00	0,00	
NiO	0,02	0,08	0,07	0,02	0,00	0,00	0,00	0,05	0,08	0,06	0,00	0,00	0,04	
total	100,94	101,00	101,26	101,00	100,51	100,59	100,31	101,54	100,98	101,23	101,06	101,14	98,16	
at%														
Si <sup>4+</sup>	1,949	1,939	1,958	1,940	1,948	1,956	1,959	1,961	1,965	1,982	1,962	1,958	1,974	
Ti <sup>4+</sup>	0,004	0,006	0,002	0,005	0,005	0,006	0,006	0,010	0,007	0,006	0,007	0,010	0,005	
Al <sup>3+</sup>	0,008	0,009	0,005	0,011	0,031	0,015	0,008	0,016	0,018	0,010	0,012	0,028	0,018	
Cr <sup>3+</sup>	0,002	0,003	0,003	0,014	0,002	0,003	0,001	0,005	0,006	0,003	0,005	0,011	0,020	
Fe <sup>3+</sup>	0,084	0,097	0,071	0,085	0,063	0,061	0,061	0,037	0,031	0,011	0,044	0,025	0,034	
Fe <sup>2+</sup>	0,244	0,237	0,255	0,240	0,259	0,261	0,262	0,286	0,293	0,308	0,282	0,291	0,079	
Mn <sup>2+</sup>	0,014	0,013	0,012	0,012	0,012	0,013	0,012	0,013	0,012	0,014	0,013	0,013	0,003	
Ca <sup>2+</sup>	0,017	0,018	0,021	0,019	0,020	0,023	0,018	0,020	0,022	0,020	0,022	0,050	0,900	
Mg <sup>2+</sup>	1,677	1,675	1,670	1,673	1,657	1,659	1,673	1,650	1,642	1,644	1,653	1,614	0,935	
Na <sup>+</sup>	0,001	0,000	0,000	0,000	0,002	0,004	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,030	
K <sup>+</sup>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	
Ni <sup>2+</sup>	0,001	0,002	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,002	0,002	0,000	0,000	0,001	
total	4,001	3,999	3,999	4,000	4,000	4,002	4,000	4,000	3,999	4,001	4,001	4,000	3,999	
Ca <sup>2+</sup> + Mg <sup>2+</sup> + Fe <sup>2+</sup>	1,938	1,930	1,946	1,932	1,936	1,943	1,953	1,956	1,957	1,972	1,957	1,955	1,914	
mol%														
En	82,94	82,63	82,80	82,94	82,89	82,78	83,07	82,79	82,60	82,90	82,61	81,52	48,00	
Fs	16,22	16,48	16,16	16,11	16,11	16,07	16,04	16,21	16,30	16,09	16,29	15,96	5,80	
Wo	0,84	0,89	1,04	0,94	1,00	1,15	0,89	1,00	1,11	1,01	1,10	2,53	46,20	



**Zał. 3.** Skład chemiczny kryształu plagioklastu badanego okazu chondrytu NWA 11778. Wyniki w % wag. Wzory chemiczne w przeliczeniu na  $8O^{2-}$ .

**App. 3.** *Chemical composition of representative plagioclase crystal of NWA 11778 chondrite. Results in wt.%. Chemical formula calculated according to  $8O^{2-}$ .*

	pl#12
SiO <sub>2</sub>	62,86
TiO <sub>2</sub>	0,04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,17
MgO	1,85
CaO	2,16
FeO	1,46
Na <sub>2</sub> O	8,60
K <sub>2</sub> O	1,01
total	100,14
at%	
Si <sup>4+</sup>	2,790
Ti <sup>4+</sup>	0,001
Al <sup>3+</sup>	1,160
Mg <sup>2+</sup>	0,122
Ca <sup>2+</sup>	0,103
Fe <sup>2+</sup>	0,054
Na <sup>+</sup>	0,740
K <sup>+</sup>	0,057
total	5,027
Ca <sup>2+</sup> +Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	0,900
mol%	
Ab	82,22
An	11,44
Or	6,33



**Zař. 5.** Skład chemiczny kryształów spineli badanego okazu chondrytu NWA 11778. Wyniki w % wag. Wzory chemiczne w przeliczeniu na  $4O^{2-}$ . Suma kationów wynosi 3.

**App. 5.** *Chemical composition of spinel crystals of NWA 11778 chondrite. Results in wt.%. Chemical formula calculated according to  $4O^{2-}$ . Total sum of cations is 3.*

	sp#27	sp#28
SiO <sub>2</sub>	0,00	13,02
TiO <sub>2</sub>	1,02	0,49
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,56	6,58
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	56,27	41,47
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,21	29,31
MgO	2,37	8,80
CaO	0,07	0,30
MnO	1,21	0,94
FeO	26,04	0,00
NiO	0,00	0,33
ZnO	0,46	0,36
total	99,21	101,61
at%		
Si <sup>4+</sup>	0,000	0,385
Ti <sup>4+</sup>	0,027	0,011
Al <sup>3+</sup>	0,315	0,229
Cr <sup>3+</sup>	1,573	0,968
Fe <sup>3+</sup>	0,112	0,651
Mg <sup>2+</sup>	0,125	0,387
Ca <sup>2+</sup>	0,003	0,010
Mn <sup>2+</sup>	0,036	0,024
Fe <sup>2+</sup>	0,770	0,000
Ni <sup>2+</sup>	0,000	0,008
Zn <sup>2+</sup>	0,012	0,008
total	2,973	2,681
mol%		
chromit	85,27%	43,26%
spinel	9,43%	23,71%
ulvit	4,50%	32,15%