

Marian SZURGOT<sup>1</sup>, Krzysztof POLAŃSKI<sup>2</sup>

## Badania meteorytu NWA 4560 za pomocą analitycznej mikroskopii elektronowej

Investigations of NWA 4560 meteorite by analytical electron microscopy

**Abstract:** Ordinary chondrite NWA 4560 was investigated by analytical electron microscopy. Elemental composition and mineral composition have been analyzed. Kamacite, troilite, olivine, orthopyroxene, clinopyroxene, and oligoclase have been identified, and mean composition of meteorite, and composition of olivine, pyroxenes and oligoclase determined. Olivine  $Fa_{30-38}$ , orthopyroxene bronzite  $Fs_{9-32}Wo_{2-4}$ , clinopyroxenes (pigeonite  $Fs_{13-17}Wo_{5-7}$ , as well as augite  $Fs_{17}Wo_{22}$ ), and oligoclase  $Ab_{80}An_{20}$  have been found in the meteorite. Olivine and pyroxene are common. POP, PO, BO, PP, RP, C, POP, GP and GOP chondrules have been identified. Elemental and mineral composition, atomic ratios and microstructure indicate that NWA 4560 is a type 3.2 ordinary chondrite which belongs to LL group.

**Keywords:** Analytical electron microscopy, thin sections, extraterrestrial matter, NWA 4560

### Wstęp

Analityczna mikroskopia elektronowa jest współczesną techniką analityczną wykorzystywaną od wielu lat w badaniach minerałów i skał ziemskich i pozaziemskich, kryształów syntetycznych, stopów i kompozytów. Analityczna mikroskopia elektronowa pozwala określić skład pierwiastkowy, skład mineralny, mikrostrukturę i teksturę skał ziemskich i pozaziemskich oraz wielu innych materiałów wytworzonych w laboratoriach ziemskich i materiałów wytworzonych na stacjach orbitalnych w warunkach mikrogravitacji. W celu analizy składu chemicznego badanego materiału rejestruje się promieniowanie rentgenowskie generowane przez wiązkę elektronów w czasie skanowania powierzchni próbki. Promieniowanie to jest wysokoenergetycznym promieniowaniem elektromagnetycznym. Energia kwan-

<sup>1</sup> Centrum Nauczania Matematyki i Fizyki Politechniki Łódzkiej, Al. Politechniki 11, 90-924 Łódź; e-mail: mszurgot@p.lodz.pl, mszurgot@gmail.com

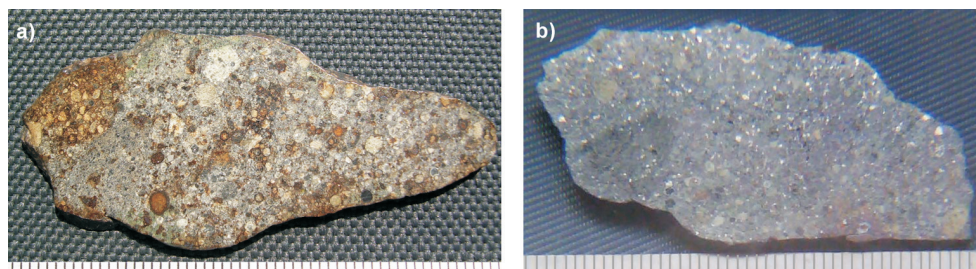
<sup>2</sup> Katedra Fizyki Ciała Stałego Uniwersytetu Łódzkiego, Pomorska 149/153, 90-236 Łódź; e-mail: kpolansk@uni.lodz.pl

tów charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego jest ściśle związana z rodzajem emitujących pierwiastków, a natężenie linii widma rentgenowskiego jest proporcjonalne do koncentracji pierwiastków w badanym obszarze materiału. Jednak oddziaływanie wiązki elektronów z próbką podczas skanowania prowadzi nie tylko do emisji promieni rentgenowskich, ale również do wybijania elektronów wtórnych (SE), emisji światła widzialnego (katodoluminescencji, CL), generacji elektronów elastycznie wstecznie rozproszonych (BSE) i innych mniej znaczących efektów (Reed 2005; Barbacki 2005; Polański 2008). Każde z tych zjawisk, po zastosowaniu odpowiedniego detektora umieszczonego przy próbce jest wykorzystywane do tworzenia obrazu w skaningowym mikroskopie elektronowym i odzwierciedlenia różnej właściwości badanego materiału. Topografię badanej powierzchni wraz ze wstępną informacją o składzie pierwiastkowym rejestruje się w reżymie elektronów wstecznie rozproszonych (BSE). Ten rodzaj detekcji, oprócz detekcji promieniowania X, jest od wielu lat wykorzystywany w badaniach meteorytów w wielu polskich (Biała i Manecki 2011) oraz w wielu zagranicznych ośrodkach naukowych (np. Brearley i Jones 1999; Hutchison 2004). W stosowanym przez nas mikroanalizatorze rentgenowskim pomiar widma promieniowania X jest przeprowadzany metodą energodispersyjną (EDX). Polega ona na jednoczesnej detekcji całego, emitowanego z danego obszaru meteorytu widma rentgenowskiego, a następnie przetworzeniu dostarczonych sygnałów przez komputer analizatora. Przetworzenie prowadzi do uszeregowania poszczególnych linii promieniowania X względem ich energii i utworzenia widma energetycznego, nazywanego widmem EDS lub EDX, które zawiera podstawowe dane dla jakościowej i ilościowej analizy pierwiastków znajdujących się w analizowanym obszarze próbki (np. Polański 2008). Analityczna mikroskopia elektronowa jest metodą nieniszczącą, w badaniach kosmomineralogicznych metodą standardową, niezbędną dla analizy skał pozaziemskich, niezbędną do charakteryzacji znanych i odkrywania nowych minerałów pozaziemskich.

Celem tej pracy było określenie i zanalizowanie składu pierwiastkowego i mineralnego meteorytu NWA 4560, zidentyfikowanie i zanalizowanie jego minerałów, a także wstępna analiza chondr i matriks meteorytu. Meteoryt znaleziono w czerwcu 2006 roku w Erfoud w Maroku. Masa główna (400 g) meteorytu NWA 4560 jest w posiadaniu Pana Marcina Cimały (Cimała 2013). Meteoryt ten został przez Buncha sklasyfikowany jako chondryt zwyczajny grupy LL3.2 (Weisberg i in. 2010; Bunch 2013). Zgodnie z najnowszą klasyfikacją podaną w Meteoritical Bulletin Database (Bunch 2013) NWA 4560 zawiera oliwin ( $\text{Fa}_{6,7-32,5}$ ) z domieszką  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (średnio 0,17% wag.) oraz piroksen ( $\text{Fs}_{1,4-27,7}\text{Wo}_{1,8}$ ). Brak danych o innych minerałach i tylko wstępne określenie stopnia zszokowania i stopnia zwietrzenia (S2, W2; Cimała 2013) wskazują, że ten nowy materiał pozaziemski wart jest przeprowadzenia bardziej szczegółowych badań. Podjęliśmy je, a nasze początkowe wyniki uzyskane techniką płytek cienkich, mikrospektroskopią Ramana i analityczną mikroskopią elektronową były prezentowane jako materiał konferencyjny (Szurgot 2009; Szurgot i Polański 2009; Szurgot i in. 2011).

## Metody badań

Badania składu pierwiastkowego, mineralnego i mikrostruktury meteorytu prowadzono stosując skaningowy mikroskop elektronowy VEGA 5135 Tescan wyposażony w mikroanalizator rentgenowski EDX Link 300 produkcji Oxford Instruments. Topografię badanej powierzchni wraz ze wstępną informacją o składzie pierwiastkowym uwidocznionym w zróżnicowanym kontraście obrazu rejestrowano w reżymie elektronów wstecznie rozproszonych (BSE). Celem analizy składu chemicznego meteorytu rejestrowano emitowane z badanych mikroobszarów promieniowanie X. Następnie w oparciu o otrzymane widmo tego promieniowania, wyliczono ilościowy skład pierwiastkowy badanej powierzchni. Do kalibracji wykorzystywano minerały o znanym składzie chemicznym oraz program ZAF do korekcji składu pierwiastkowego. Badania pod skaningowym mikroskopem elektronowym prowadziliśmy na okazie meteorytu w postaci wypolerowanej grubej płytki płasko-równoległej o wymiarach 18×18×2 mm. Płytkę tę następnie została zeszlifowana do postaci płytki cienkiej. Przeprowadzono również badania mikrostruktury meteorytu pod mikroskopem optycznym polaryzacyjnym w świetle przechodzącym na płycie cienkiej oraz w świetle odbitym na wypolerowanej płytce grubej (rys. 1).



**Rys. 1.** Chondryt zwyczajny NWA 4560. (a) Widok ogólny meteorytu. (b) Obraz przy skośnym oświetleniu ujawniający fazy metaliczne: kamacyt i troilit. Szarzielone minerały to klinopiroksen pigeonit, a żółtozielone to ortopiroksen. Minerale brązowe i miodowe to oliwin, białawe to plagioklaz, prawie czarne to augit i chromit. Fazy metaliczne: kamacyt i troilit widać jako jasne plamki. Wymiary płytki meteorytu: 58×28×2,5 mm.

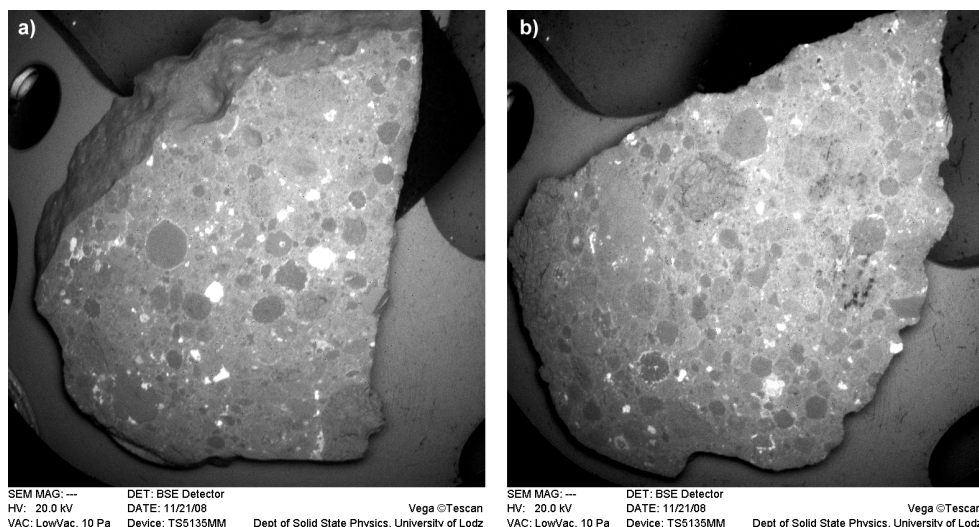
## Wyniki

Rysunki 1a i 1b prezentują okaz meteorytu NWA 4560. Pokazują mikrostrukturę meteorytu, ujawniają obecność chondr i drobnokrystalicznego matriks. Szarzielone minerały to klinopiroksen pigeonit, a żółtozielone to ortopiroksen. Minerale brązowe i miodowe reprezentują oliwin, minerały białawe to skaień, a czarne to augit i chromit. Chondry są w większości wyraźne, a matriks zawiera te same minerały co chondry. Zdjęcia te pokazują, że w składzie mineralnym meteorytu dominują oliwiny i pirokseny. Fazy metaliczne: kamacyt i troilit widoczne jako jasne plamki stanowią nieco ponad 2% minerałów tworzących chondryt. Kolory minerałów i niska zawartość faz metalicznych wskazują, że meteoryt ten jest podobny do chondrytów grupy LL.

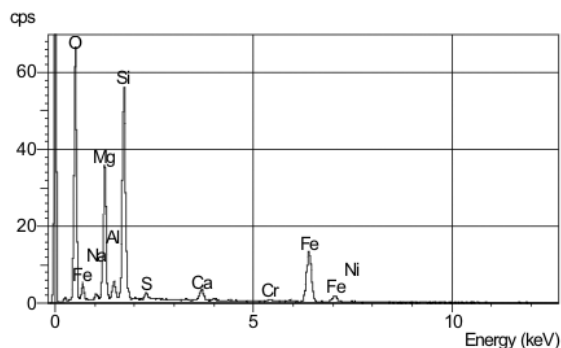
Rysunki 2a i 2b to obrazy BSE meteorytu ze skaningowego mikroskopu elektronowego. Obrazy uwidaczniają całą powierzchnię badanego okazu chondrytu. Prezentują typową mikrostrukturę chondrytu: ciemne i jasne chondry, drobnokrystaliczny matriks (jasny) oraz fazy metaliczne (białe plamki).

Przykładowe widmo EDS meteorytu NWA 4560 pokazano na rys. 3. Widmo to otrzymano z dużego obszaru, bo z całej powierzchni meteorytu (225 mm<sup>2</sup>). Reprezentuje ono średni skład pierwiastkowy chondrytu. Analiza średniego składu NWA 4560 z wykorzystaniem analitycznej mikroskopii elektronowej pokazuje, że głównymi pierwiastkami tworzącymi materię tego chondrytu są: O (42,86 % wag.), Fe (18,52%), Si (19,46%) oraz Mg (13,73%), które obejmują około 94,6 % wagi całego składu mineralnego NWA 4560. Istotnymi składnikami meteorytu o wkładzie łącznym około 5,4% wagi NWA 4560 są: Al (1,67% wag.), Ca (1,41%), S (0,71%), Na (0,94%), Cr (0,38%) i Ni (0,31%) (tab. 1). Obecny jest też węgiel w śladowych ilościach, ale nie został przez nas określony. Ten skład i proporcje pierwiastków są zbliżone do składu wcześniej badanych chondrytów zwyczajnych grupy LL (Hutchison 2004; Sears 1978), ale istnieją pewne różnice. Zawartość niektórych pierwiastków, takich jak: O, Si, Fe, Ca i Cr jest bliska innym chondrytom zwyczajnym LL, zawartość Al i Na jest wyższa, a zawartość Mg, S, Ni jest niższa. Nasza analiza nie wykazuje obecności pierwiastków: Mn, P, K, Ti, Co, H oraz C wykrytych w innych chondrytach grupy LL (Hutchison 2004; Sears 1978).

Ważnym etapem badań nowych meteorytów jest analiza wybranych stosunków zawartości pierwiastków. Stosunki atomowe pierwiastków: Al/Si, Fe/Si, Ni/Si, Mg/Si, Ca/Si oraz Ca/Al w meteorycie NWA 4560 zostały przez nas określone i zamieszczone w tabeli 2. Stosunki atomowe wybranych pierwiastków tworzących



**Rys. 2.** Obrazy BSE chondrytu zwyczajnego NWA 4560 uzyskane pod skaningowym mikroskopem elektronowym. Obrazy pokazują chondry i matriks. (a) Powierzchnia oznaczona jako awers, (b) rewers meteorytu. Obrazy pokazują chondry i matriks. Pole widzenia: (a) 17×17 mm, (b) 18×18 mm.



**Rys. 3.** Widmo EDS chondrytu z dużego obszaru meteorytu (15mmx15mm) reprezentujące średni skład pierwiastkowy meteorytu. Powierzchnia oznaczona jako rewers.

meteoryt NWA 4560 wynoszą:  $Mg/Si = 0,81$ ,  $Fe/Si = 0,48$  i  $Al/Si = 0,09$ ,  $Ca/Si = 0,051$ ,  $Ca/Al = 0,57$ ,  $Ni/Si = 0,008$ . Pokazują, że pomimo wykrytych różnic w bezwzględnej zawartości pierwiastków stosunki atomowe pierwiastków meteorytu NWA 4560 są zbliżone do określonych wcześniej stosunków zawartości pierwiastków w chondrytach zwyczajnych należących do grupy LL (Hutchison 2004; Wasson 1985; Sears 1978).

**Tabela 1.** Średnia zawartość pierwiastków w chondrycie NWA 4560, w chondrytach zwyczajnych LL i w chondrycie Cherokee Springs.

Pierwiastek	NWA 4560 % wagowe (atomowe)	Chondryty LL % wagowe (Hutchison 2004)	Cherokee Springs LL % wagowe (Sears 1978)
O	42,86 (60,32)	40,0	42,21*
Si	19,46 (15,60)	18,9	19,8
Mg	13,73 (12,71)	15,3	15,25
Fe	18,52 (7,47)	18,5	15,88
S	0,71 (0,50)	2,3	2,13
Al	1,67 (1,39)	1,19	1,12
Ca	1,41 (0,79)	1,30	1,32
Ni	0,31 (0,12)	1,02	0,97
Na	0,94 (0,92)	0,70	0,08
Cr	0,38 (0,17)	0,374	0,35
Mn		0,262	0,52
P		0,085	0,08
C		0,12	0,03
K		0,079	0,09
Ti		0,062	0,10
Co		0,049	0,05
H			0,02
Suma	100 (100)		100

\* Zawartość tlenu określono przez uzupełnienie do 100.

**Tabela 2.** Stosunki atomowe zawartości pierwiastków w meteorycie NWA 4560 i w chondrytach zwyczajnych LL (Hutchison 2004; Wasson 1985; Sears 1978).

Stosunek	NWA 4560	Chondryty LL (Hutchison 2004)	Chondryty LL (Wasson 1985)	Cherokee Springs LL (Sears 1978)
Al/Si	0,09*	0,07*	0,065*	0,06*
Fe/Si	0,48	0,49	0,53	0,40
Mg/Si	0,81	0,93		0,89
Ni/Si	0,008	0,026		0,023
Ca/Si	0,051	0,048	0,047	0,047
Ca/Al	0,57	0,74	0,72	0,83

\* Do tych obliczeń wykorzystano zawartość pierwiastków wyrażoną w% atomowych.

Tabela 3 prezentuje skład tlenkowy chondrytu NWA 4560 i skład chondrytów zwyczajnych należących do grupy LL, wyrażony w procentach wagowych. Zgodnie z tymi danymi NWA 4560 zawiera: SiO<sub>2</sub> (41,62%), MgO (22,76%), FeO (16,94% w postaci Fe<sup>2+</sup>, a 23,83% łącznie dla całego Fe w meteorycie), FeS (1,95%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (3,16%), CaO (1,98%), Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,56%), Na<sub>2</sub>O (1,27%), Fe (4,11%) oraz Ni (0,31%).

Dane tabeli 3 pokazują, że średni skład tlenkowy meteorytu NWA 4560 dokumentuje podobny zakres wartości wykrytych tlenków co inne chondryty LL. Dane literaturowe o składzie chondrytów grupy LL, dawniej nazywanych chondrytami

**Tabela 3.** Średni skład tlenkowy meteorytu NWA 4560 i chondrytów zwyczajnych LL, a także zawartość w nich FeS, Fe oraz Ni.

Tlenek	NWA 4560% wagowe	Chondryty LL% wagowe (Mason 1962)
SiO <sub>2</sub>	41,62	34,82
MgO	22,76	23,57
FeO	23,83 <sup>#</sup> (16,94) <sup>##</sup>	24,34
FeS	1,95	5,12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,16	2,18
CaO	1,98	2,17
Na <sub>2</sub> O	1,27	0,69
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,56	0,58
MnO	nd	0,20
K <sub>2</sub> O	nd	0,23
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	nd	0,20
TiO <sub>2</sub>	nd	0,15
Fe <sup>0</sup>	4,11*	4,02
Ni <sup>0</sup>	0,31	0

<sup>#</sup> Dla całego Fe w meteorycie, <sup>##</sup> Zawartość dla Fe<sup>2+</sup> po odjęciu Fe<sup>0</sup> i FeS.

\* Dane przy założeniu, że całe Fe<sup>0</sup> jest obecne w kamacycie.

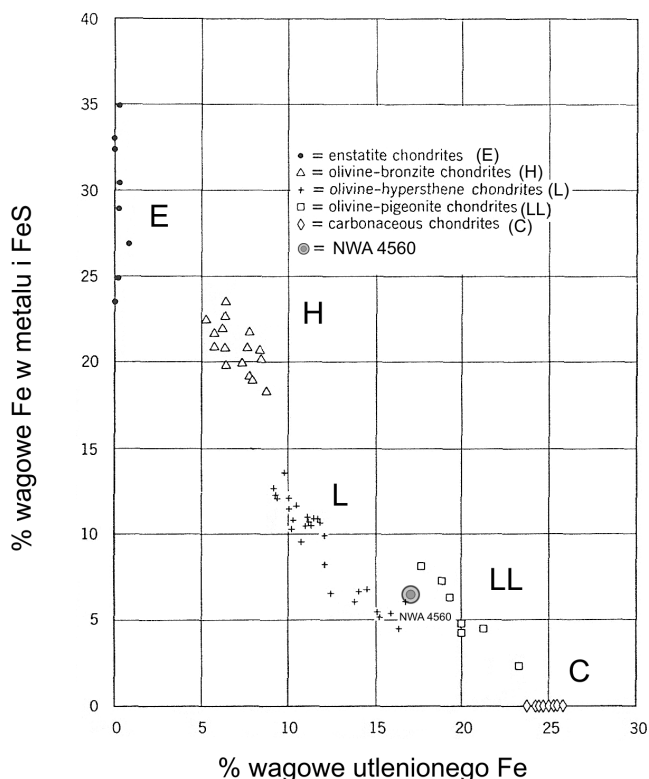
nd – nie wykryto.



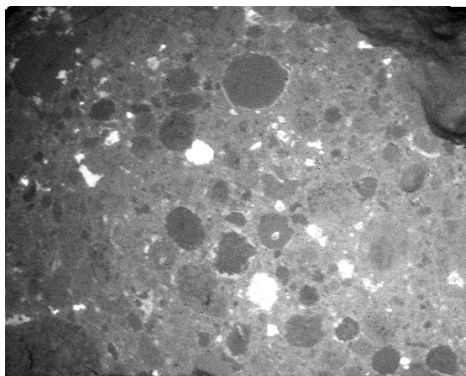
oliwinowo-pigeonitowymi, pochodzą z monografii Masona (Mason 1962). Najbardziej zbliżone wartości wykazują następujące tlenki:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  oraz  $\text{Fe}^0$ . Oznacza to, że zawartość oraz skład głównych minerałów: oliwinów i piroksenów, a także zawartość kamacytu są w meteorycie NWA 4560 i w chondrytach grupy LL bardzo zbliżone.

Więcej niż w innych chondrytach grupy LL jest w meteorycie NWA 4560 tlenków budujących skalenie:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i  $\text{Na}_2\text{O}$ , stąd można sądzić, że w NWA 4560 powinno być więcej skaleni. Zawartość troilitu  $\text{FeS}$  jest z kolei niższa w NWA 4560 niż w innych chondrytach LL.

Sumaryczna zawartość faz metalicznych: kamacytu 4,42 %wag. [ $\text{Fe}$  (4,11 %wag.) +  $\text{Ni}$  (0,31 %wag.)] oraz  $\text{FeS}$  (1,95 %wag.) wynosi 6,37% wagowych. Ponieważ gęstość kamacytu ( $7,9 \text{ g/cm}^3$ ) jest około 2,46 razy większa niż średnia gęstość chondrytów LL ( $3,21 \text{ g/cm}^3$ , Consolmagno i in. 2008), a gęstość troilitu ( $4,6\text{--}4,8 \text{ g/cm}^3$ , Krinov 1960) około 1,44 razy większa niż meteorytu zawartość objętościowa faz metalicznych powinna być rzędu 3,1%, co jest wartością nieco wyższą niż wskazują na to nasze wstępne dane z obrazów BSE (około 2,6% obj., rys. 5). Uwzględnienie drugiej fazy żelazo-niklu tj. taenitu, którego gęstość ( $8,26 \text{ g/cm}^3$ ) jest większa niż kamacytu powinno jeszcze zbliżyć tę oszacowaną



**Rys. 4.** Współzależność pomiędzy zawartością Fe utlenionego i Fe w metalu i  $\text{FeS}$  dla różnych grup chondrytów (dane dla obserwowanych spadków) opublikowana w monografii Masona (Mason 1962) wraz z naszymi danymi dla chondrytu NWA 4560.



**Rys. 5.** Obraz BSE meteorytu NWA 4560 obejmujący duży obszar meteorytu. Zawartość faz metalicznych w tym obszarze 2,6% obj. Pole widzenia 16,7×16,4mm.

z masy składników zawartość objętościową faz metalicznych w chondrycie NWA 4560.

Dwie wartości określone dla meteorytu NWA 4560: 6,37% wag. Fe jako metalu ( $Fe^0$  w kamacycie, taenicie i w FeS) oraz 16,94% wag. FeO (tab. 3) umiejscawiają punkt na wykresie prezentowanym w monografii Masona (Fig. 29. na str. 78, Mason 1962), który mieści się w obszarze klastera chondrytów LL, dość blisko pogranicza z chondrytami grupy L (rys. 4). Oznacza to, że NWA 4560 jest chondrytem należącym do grupy LL, ale bliskim grupie L.

Tabela 4 prezentuje dane mineralogiczne dla chondrytów LL (= oliwinowo-pigeonitowych) zebrane przez Masona (Masona 1960) oraz nasze dane o chondrycie NWA 4560. Pokazują one, że zawartość Fe-Ni jest w zakresie chondrytów LL, zawartość troilitu jest wyraźnie niższa, a zawartość globalna Fe oraz FeO jest w NWA 4560 trochę mniejsza niż w chondrytach LL. Stosunek  $FeO/(FeO+MgO) = 29$  jest w NWA 4560 bliski chondrytom LL (32–40). Oliwiny i pirokseny występują powszechnie w NWA 4560 i są dominującymi minerałami (rys. 1a).

Obecność sodu (Na) i glinu (Al) w średnim składzie pierwiastkowym chondrytu NWA 4560 dowodzi, że skałen sodowo-wapniowy, plagioklaz  $NaAlSi_3O_8$ - $CaAl_2Si_2O_8$  jest obecny w tym meteorycie. Skład plagioklazu, który jest kryształem mieszanym dwóch składników: albitu (Ab)  $NaAlSi_3O_8$  oraz anortytu (An)  $CaAl_2Si_2O_8$  można określić z zawartości Na i Al. Ponieważ nie wykryliśmy potasu w składzie średnim meteorytu NWA 4560 oznacza to, że plagioklaz tego chondrytu nie zawiera ortoklazu, tylko albit i anortyt. Dlatego jego skład może być wyrażony jako  $Ab_xAn_{1-x}$ , gdzie x to ułamek molowy albitu w plagioklazie, a  $1-x$  ułamek molowy anortytu.

Zawartość molową (ułamek molowy) albitu x można określić z zależności

$$x = Ab(\% \text{ mol.}) = Na/[Na + Ca(An)] \quad (1)$$

gdzie Na oznacza zawartość sodu wyrażoną w% atomowych, a Ca(An) zawartość wapnia (% atomowe) w plagioklazie. Gdy meteoryt zawiera klinopiroksen, jak w przypadku NWA 4560, wapń jest składnikiem oprócz anortytu  $CaAl_2Si_2O_8$ ,



**Tabela 4.** Dane chemiczne i mineralogiczne dla chondrytów LL (Mason 1962; Bunch 2013) oraz nasze dane dla chondrytu NWA 4560. Zawartość minerałów podano w % wagowych, a stosunek FeO/(FeO+MgO) określono poprzez % molowe.

Minerał/tlenek	Chondryty LL (Mason 1962)	NWA 4560 (Bunch 2013)	NWA 4560 (Szurgot i Polański 2013)
Oliwin (% wag.)	65–70, Fa <sub>32–40</sub> *	Fa <sub>6,7–32,5</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0,17%	FO <sub>62–70</sub> Fa <sub>30–38</sub> FO <sub>70</sub> Fa <sub>30</sub> FO <sub>69</sub> Fa <sub>31</sub> FO <sub>62</sub> Fa <sub>38</sub>
Piroksen (% wag.)	5	Fs <sub>1,4–27,7</sub> Wo <sub>1,8</sub>	En <sub>61–89</sub> Fs <sub>9–35</sub> Wo <sub>2–22</sub> En <sub>89</sub> Fs <sub>9</sub> Wo <sub>2</sub> - Opx En <sub>64</sub> Fs <sub>32</sub> Wo <sub>4</sub> - Opx En <sub>82</sub> Fs <sub>13</sub> Wo <sub>5</sub> - Cpx Pig. En <sub>76</sub> Fs <sub>17</sub> Wo <sub>7</sub> - Cpx Pig. En <sub>61</sub> Fs <sub>17</sub> Wo <sub>22</sub> - Cpx Aug.
Fe-Ni (% wag.)	0–6		4.4
Oligoklaz (% wag.)	5–10		14 Ab <sub>80</sub> An <sub>20</sub>
Troilit (% wag.)	~5		2
Fe(global.) (% wag.)	24–26		18.5
FeO (% wag.)	22–29		16.9 (23.8)
FeO/(FeO+MgO) <sup>#</sup> (% mol.)	32–40		29

\* Fa to fajalit, En to enstatyt, Fs to ferrosilit, a Wo to wollastonit (% mol.). Nasze dane o zawartości Fa, En, Wo oraz oligoklazu otrzymano za pomocą analitycznej mikroskopii elektronowej. Opx – ortopiroksen (piroksen rombowy), Cpx – klinopiroksen (piroksen jednoskośny). Pig. – pigeonit, Aug. – augit.

<sup>#</sup> FeO/(FeO+MgO) = [(FeO/MgO)x(MczMgO/MczFeO)]/[(FeO/MgO)x(MczMgO/MczFeO) + 1], gdzie FeO i MgO wyrażono w % wagowych, a MczMgO i MczFeO to masy cząsteczkowe tlenków.

także klinopiroksenu (Mg,Fe,Ca)<sub>2</sub>[Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub>]: pigeonitu i/lub augitu. Zależność (1) wynika z faktu, że jeden atom sodu występuje w cząsteczce albitu NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub> oraz jeden atom wapnia występuje w cząsteczce anortytu. Zawartość Ca w anortycie można wyrazić poprzez zawartość glinu. Ponieważ w cząsteczce anortytu jeden atom wapnia przypada na dwa atomy glinu to zawartość wapnia w anortycie

$$\text{Ca(An)} = 0,5 \text{ Al(An)} \quad (2)$$

W cząsteczce albitu na jeden atom sodu przypada jeden atom Al, stąd

$$\text{Al(Ab)} = \text{Na} \quad (3)$$

Przy założeniu, że glin występuje w danym meteorycie wyłącznie w Ab i An można zapisać, że całkowita zawartość atomowa glinu

$$\text{Al(global)} = \text{Al(Ab} + \text{An)} = \text{Al(Ab)} + \text{Al(An)} \quad (4)$$

Ponieważ

$$\text{Al(An)} = \text{Al(Ab} + \text{An)} - \text{Al(Ab)} = 2 \text{ Ca(An)} \quad (5)$$

oraz Al(Ab) = Na (wzór (3)) otrzymujemy

$$\text{Ca(An)} = 0,5 [\text{Al(Ab} + \text{An)} - \text{Na}] \quad (6)$$

Podstawiając wzór (6) do wzoru (1) otrzymujemy

$$x = \text{Ab}(\% \text{ mol.}) = 100\% [2 \text{ Na}/(\text{Al}(\text{Ab} + \text{An}) + \text{Na})] \quad (7)$$

Wzór (7) umożliwia określenie ułamka molowego Ab w plagioklazie wykorzystując zawartość atomową sodu Na oraz globalną zawartość atomową glinu  $\text{Al}(\text{Ab} + \text{An})$  w meteorycie. Dotyczy to zarówno lokalnej, punktowej zawartości Ab, jak również zawartości Ab średniej w całym meteorycie.

Zgodnie z danymi tabeli 1 mamy:  $\text{Na} = 0,92\%$  atomowe i  $\text{Al}(\text{global}) = 1,39\%$  atom. =  $\text{Al}(\text{Ab} + \text{An})$  stosując zależność (7) otrzymujemy  $x = \text{Ab}(\% \text{ mol.}) = 80$ .

Średni skład plagioklaz w meteorycie NWA 4560 to  $\text{Ab}_{80}\text{An}_{20}$ . Oznacza to, że plagioklaz ten jest oligoklazem, zgodnie z oczekiwaniem dla chondrytów LL (tab. 4), ponieważ oligoklaz to plagioklaz o składzie  $\text{Ab}_{70-90}\text{An}_{10-30}$ .

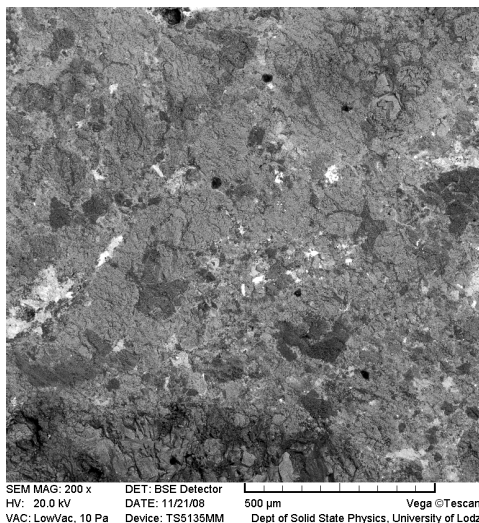
Analiza średniej zawartości pierwiastków i tlenków pokazuje, że skałen potasowo-wapniowy oligoklaz  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8\text{-CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$  stanowi 13,8% masy chondrytu NWA 4560, chromit  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$  0,82%, troilit  $\text{FeS}$  1,95% masy meteorytu, Fe-Ni, głównie kamacyt 4,42%. Oligoklaz, chromit, troilit i kamacyt stanowią 21% masy meteorytu NWA 4560. Pozostały, dominujący wkład (79%) do masy meteorytu pochodzi od głównych minerałów: oliwinu  $(\text{Mg,Fe})_2[\text{SiO}_4]$  i od piroksenów (klinopiroksenu pigeonitu, a także augitu  $(\text{Mg,Fe,Ca})_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$  oraz od ortopiroksenu  $(\text{Mg,Fe})_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$ ). Skład piroksenu jest określany poprzez skrótowy zapis, gdzie En to enstatyt  $\text{Mg}_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$ , Fs to ferrosilit  $\text{Fe}_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$ , a Wo to wollastonit  $\text{Ca}_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$  (tab. 4). Niższa zawartość wollastonitu, dochodząca do 5% mol. w piroksenie dowodzi struktury rombowej piroksenu, wyższa zawartość wollastonitu, 5–15% molowych prowadzi do tworzenia piroksenu o strukturze jednoskośnej, tj. do tworzenia pigeonitu. Literaturowe dane pokazują, że sumaryczny wkład oliwinu i piroksenu w chondrytach LL wynosi 70–75% wag. (tab. 4) (Mason 1962). Nasze dane wskazują, że oliwin i pirokseny stanowią nieco więcej, bo 79% masy meteorytu NWA 4560, a to oznacza że nasze wyniki wskazują na NWA 4560 jako chondryt LL.

Tabela 4 prezentuje skład oliwinu  $(\text{Mg,Fe})_2[\text{SiO}_4]$ , ortopiroksenu  $(\text{Mg,Fe})_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$ , a także klinopiroksenu  $(\text{Mg,Fe,Ca})_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$  wykrytych przez nas w meteorycie NWA 4560 oraz wykrytych i określonych w meteorycie NWA 4560 przez Buncha (Bunch 2013). Nasze dane pokazują, że oliwin w NWA 4560 wykazuje skład  $\text{Fo}_{62-70}\text{Fa}_{30-38}$ , a lokalne wartości w chondrach i w matriks wynoszą:  $\text{Fo}_{70}\text{Fa}_{30}$ ,  $\text{Fo}_{69}\text{Fa}_{31}$ ,  $\text{Fo}_{62}\text{Fa}_{38}$  (Fa to fajalit  $\text{Fe}_2[\text{SiO}_4]$ , a Fo to forsteryt  $\text{Mg}_2[\text{SiO}_4]$ ). Mikrostrukturę oraz lokalny skład minerałów meteorytu, także oliwinów, zilustrowano na rysunkach 6, 7 i 8, które prezentują chondry i matriks. Nasze dane o zawartości Fa w oliwinie  $\text{Fa}_{30-38}$  meteorytu NWA 4560 są zgodne z oczekiwaniami dla chondrytu LL, ponieważ wg danych Masona (Mason 1962) zawartość fajalitu dla chondrytów wynosi  $\text{Fa}_{32-40}$  (tab. 4). Oliwin w NWA 4560 wg danych Buncha (Bunch 2013) zawiera  $\text{Fa}_{6,7-32,5}$ , co oznacza niższą niż nasz okaz meteorytu NWA 4560 zawartość Fa, a w świetle danych Masona jest zakresem wartości niskich, jak na chondryt LL.

Piroksen w NWA 4560 według naszych danych wykazuje zakres składu:  $En_{61-89}Fs_{9-35}Wo_{2-22}$ , a lokalne analizy ujawniły skład: ortopiroksen  $En_{89}Fs_9Wo_2$  i  $En_{64}Fs_{32}Wo_4$  (bronzyt i hipersten), klinopiroksen pigeonit:  $En_{82}Fs_{13}Wo_5$  i  $En_{76}Fs_{17}Wo_7$  oraz klinopiroksen augit  $En_{61}Fs_{17}Wo_{22}$  (tab. 4, rys. 7, 8). Tabela 4 wykazuje brak danych o składzie piroksenów w chondrytach LL w zestawieniu Masona, a piroksen w NWA 4560 wg Buncha zawiera  $Fs_{1.4-27.7}Wo_{1.8}$ , co oznacza, że jest ortopiroksemem. My wykryliśmy szerszy zakres zawartości wollastonitu w piroksenie NWA 4560:  $Wo_{2-22}$ , oprócz ortopiroksenu  $Wo_{2-4}$ , stwierdziliśmy występowanie także klinopiroksenu pigeonitu  $Fs_{13-17}Wo_{5-7}$  oraz klinopiroksenu augitu  $Fs_{17}Wo_{22}$  (tab. 4, rys. 7, 8). Ponieważ chondryty grupy LL to wg dawnej nomenklatury chondryty oliwinowo-pigeonitowe obecność pigeonitu w NWA 4560 jest naturalna.

Rysunek 6 to obraz BSE dużego obszaru matriks meteorytu NWA 4560. Zawartość pierwiastków obecnych w tym obszarze meteorytu jest bardzo podobna do średniego składu meteorytu obejmującego chondry i matriks. Stosunki atomowe wybranych pierwiastków z tego obszaru wynoszą:  $Mg/Si = 0,81$ ,  $Fe/Si = 0,50$  i  $Al/Si = 0,09$ ,  $Ca/Si = 0,05$ ,  $Ca/Al = 0,56$ ,  $Ni/Si = 0,01$ , są praktycznie takie jak ustalone dla średniego składu meteorytu NWA 4560 (tab. 2), z jednym wyjątkiem. Matriks wykazuje nieco wyższy stosunek  $Fe/Si = 0,50$ , niż meteoryt NWA 4560 średnio  $Fe/Si = 0,48$  (tab. 2). Oznacza to nieco wyższą zawartość Fe w drobnokrystalicznym matriks, co widać także na obrazie BSE, który zawiera mniej fragmentów ciemniejszych, tj. o mniejszej zawartości Fe – niższej zawartości Fa w oliwinie i niższej zawartości Fs w piroksenie.

Rysunki 7 i 8 to obrazy BSE mikrostruktury meteorytu NWA 4560, głównie obszary chondr i przyległego matriks. Prezentują obecność dobrze rozróżnialnych

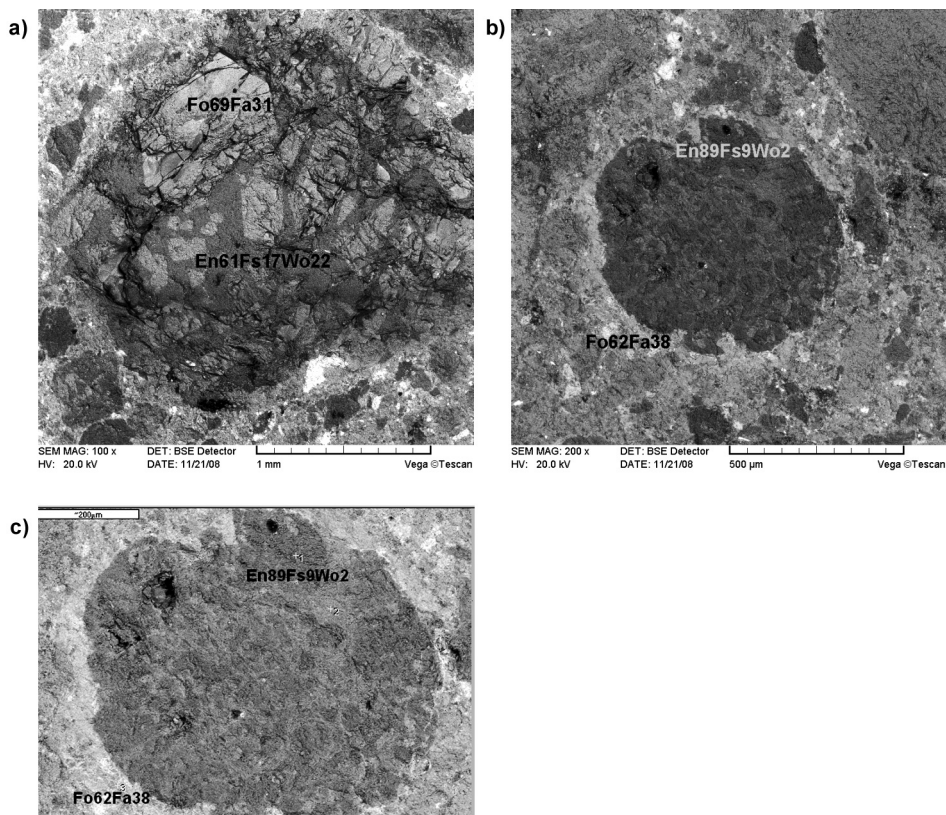


**Rys. 6.** Obraz BSE matriks chondrytu NWA 4560 z dużego obszaru meteorytu: 1,25×1,25 mm. Skład pierwiastkowy tego obszaru jest zbliżony do składu całego meteorytu. To oznacza, że matriks i chondry są utworzone z tych samych minerałów.

chondr, złożonych z agregatów kryształów oliwinów i piroksenów oraz ujawniają drobnokryształiczną strukturę matriks otaczającego chondry.

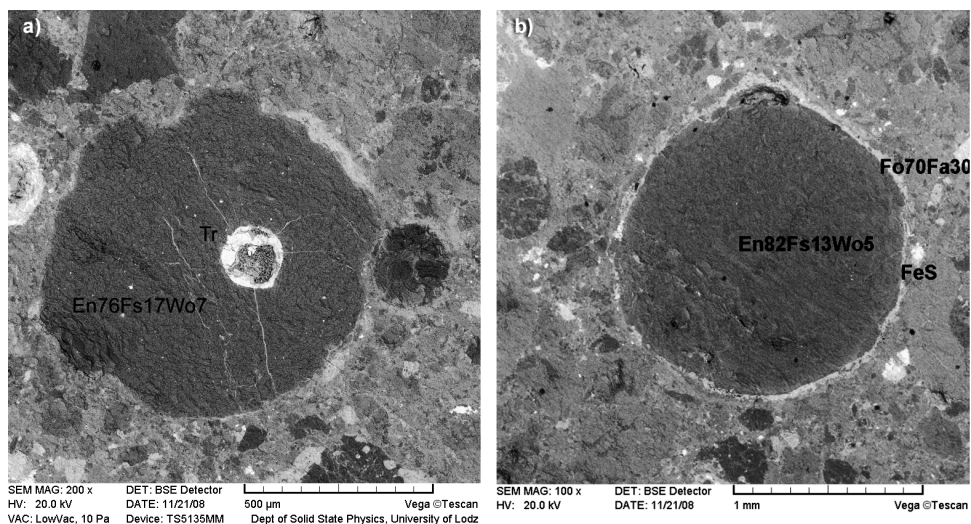
Literaturowe dane wskazują, że chondry w różnych grupach chondrytów mają różny średni rozmiar, który zmienia się około 7 razy od chondr najmniejszych występujących w chondrytach CO do chondr największych obecnych w chondrytach CV (Rubin 2000). Tak więc średni rozmiar chondr jest ważnym wskaźnikiem przynależności do określonej grupy meteorytów.

W meteorycie NWA 4560 najczęściej występują chondry porfirowe oliwinowe (PO) i chondry porfirowe oliwinowo-piroksenowe (POP) (rys. 7, 8). Czasem widoczne są euhedralne kryształy oliwinów (rys. 7). W niektórych chondrach obecne są globule i żyłki troilitowe i troilitowo-kamacytowe (rys. 8). Analiza wielkości chondr w meteorycie NWA 4560 pokazuje, że ich średnice mieszczą się w przedziale 0,2–3,2 mm. Trzy rozmiarowe grupy chondr można wyróżnić: chondry małe 0,2–0,7 mm, chondry średnie 0,8–1,4 mm i nieliczne chondry duże 1,5–3,2



**Rys. 7.** Obrazy BSE chondr porfirowych oliwinowo-piroksenowych (POP) oraz otaczającego je drobnokryształicznego matriks w meteorycie NWA 4560. Oliwiny i pirokseny są reprezentowane przez kolor szary. Kolor ciemnoszary chondr i okruchów drobnokryształicznego matriks świadczy o większej zawartości forsterytu (Fo) w oliwinie, lub większej zawartości ferrosilitu (Fs) w piroksenie, kolor jasnoszary oznacza dużą zawartość Fa lub/i Fs. Minerale jasne to kamacyt (Fe,Ni) i troilit (FeS). Średnica chondr: (a) 2,7 mm, (b) 1 mm, (c) 0,8 mm.



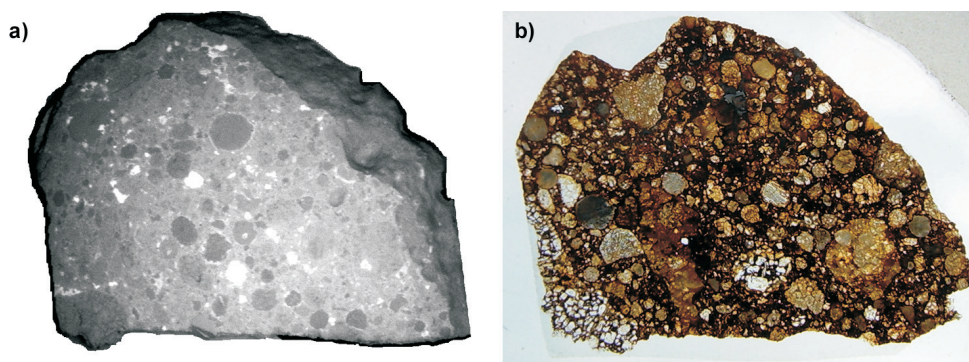


**Rys. 8.** Obrazy BSE chondr i matriks w meteorycie NWA 4560. a) Duża chondra pigeonitowa z globulą troilitową oraz przylegająca do niej mała chondra porfirowa (PO). Wewnątrz chondry są żyłki troilitowe. b) Duża chondra ziarnista piroksenowa (GP) pigeonitowa z otoczką troilitowo-kamacytową. W otaczającym matriks widać euhedralne kryształy oliwinów oraz małe globule kamacytu i troilitu. Średnica chondr: (a) 1 mm chondra duża, 0,2 mm chondra mała, (b) 1,7 mm chondra duża, 0,45 mm chondra mała.

mm. W meteorycie NWA 4560 dominują chondry średnie około 1 mm, co jest oczekiwane dla chondrytów zwyczajnych grupy LL, w których średnia wartość średnicy wynosi 0,9 mm (Hutchison 2004; Brearley i Jones 1999).

Rysunek 9a prezentuje obraz mikrostruktury meteorytu NWA 4560 uzyskany w skaningowym mikroskopie elektronowym, a rysunek 9b obraz optyczny tego meteorytu w świetle przechodzącym, niespolaryzowanym po jego zeszlifowaniu do postaci płytki cienkiej. Oba obrazy pokazują mikrostrukturę meteorytu NWA 4560, ujawniają minerały budujące ten chondryt, tworzące chondry oraz matriks.

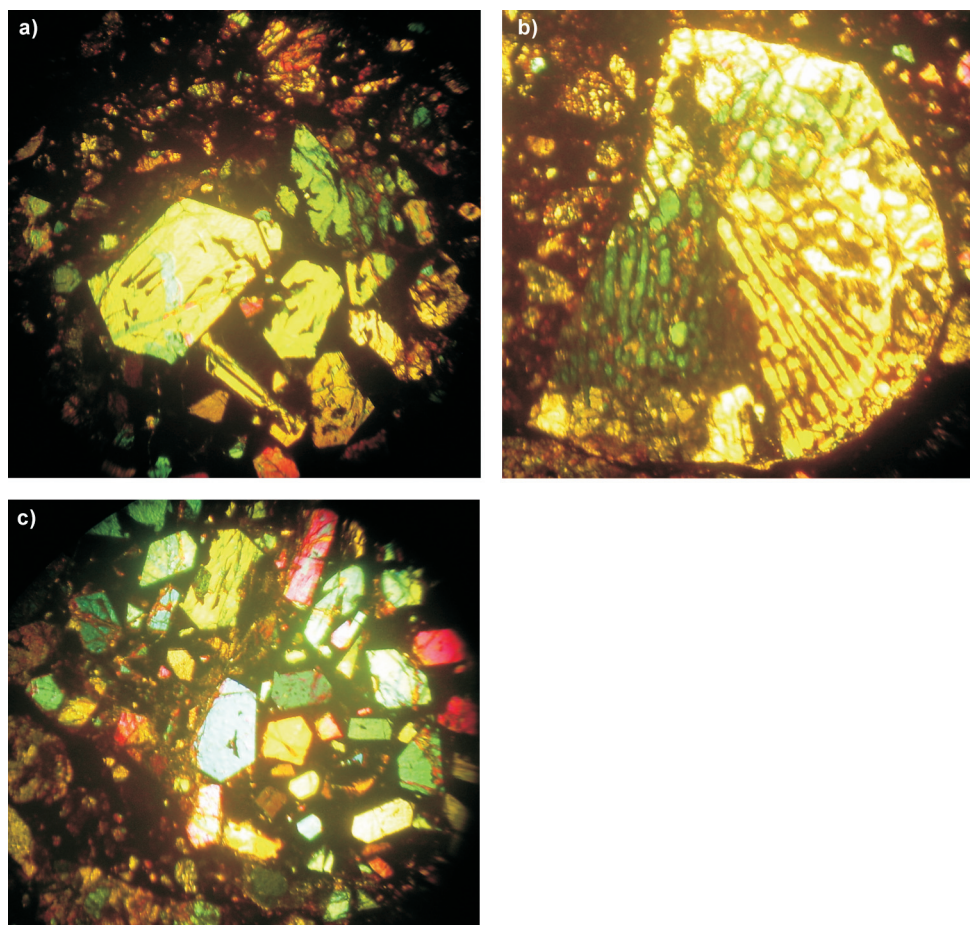
Zastosowanie techniki płytek cienkich dostarcza nowych, ważnych informacji o skale pozaziemskiej, informacji uzupełniających do analitycznej mikroskopii ele-



**Rys. 9.** a) Obraz BSE meteorytu NWA 4560, b) obraz optyczny tego meteorytu zeszlifowanego do postaci płytki cienkiej uzyskany w świetle przechodzącym, nie spolaryzowanym. Wymiary meteorytu: 19×13,5 mm.

tronowej. Technika płytek cienkich jest metodą klasyczną w analizie petrograficzno-mineralogicznej skał i minerałów ziemskich i pozaziemskich. Przy standardowych grubościach szlifów 0,03 mm znaczna część minerałów jest przezroczysta dla światła widzialnego, a ich optyczne, mechaniczne i inne fizyczne charakterystyki, takie jak dwójłomność, barwa interferencyjna, typ wygaszenia optycznego, morfologia kryształów, charakterystyczne zbliżniaczenia oraz płaszczyzny łupliwości umożliwiają, jako cechy diagnostyczne, identyfikację składników skał pod mikroskopem polaryzacyjnym w świetle spolaryzowanym, najczęściej przechodzącym, co jest dobrze widoczne dla meteorytu NWA 4560 (rys. 9b, 10–12).

Chondryty należą do grupy meteorytów, które utworzone w początkach formowania się Układu Słonecznego, zawierają zapis ewolucji naszego układu planetarnego, a analiza ich minerałów krystalicznych i amorficznych dostarcza wiedzy o historii, ewolucji oraz o przeobrażeniach materii Wszechświata. Chociaż wyko-

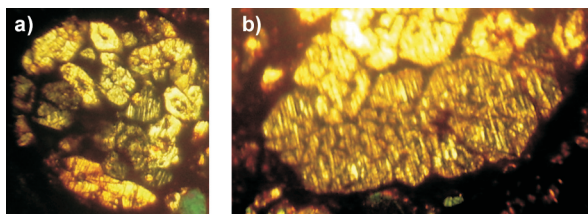


**Rys. 10.** a) Chondra porfirowa oliwinowa PO, średnica 2,4 mm, b) Chondra belkowa oliwinowa BO, średnica 1,5 mm), c) euheralne kryształy oliwinów z matryks je otaczającym. c) Pole widzenia 2x2 mm. Mikroskop polaryzacyjny, polaroidy skrzyżowane.

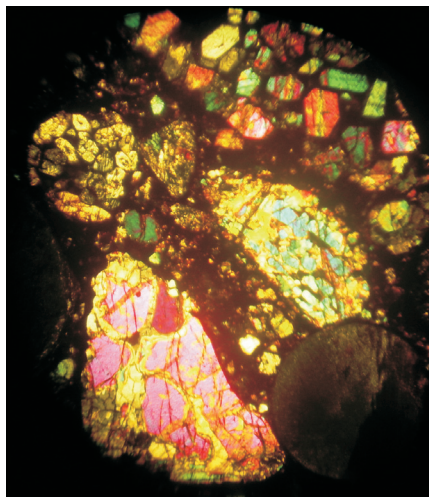


rzystanie analitycznej mikroskopii elektronicznej do badań materii chondrytu NWA 4560 było głównym naszym celem, w tej części pracy dokonana będzie krótka prezentacja wyników badań minerałów meteorytu NWA 4560 za pomocą techniki płytek cienkich.

Technika cienkich płytek ujawniła (rys. 9b, 10, 11, 12), że w meteorycie NWA 4560 występują różne tekstualne typy chondr: porfirowo-oliwinowe (PO, rys. 10a), belkowe oliwinowe (BO, rys. 10b), porfirowe piroksenowe (PP, rys. 11a, 12), kryptokrystaliczne (C) (rys. 12, 9b), ziarniste piroksenowe (GP) (rys. 9b) oraz ziarniste oliwinowo-piroksenowe (POP, (rys. 9b). Technika ta umożliwiła zidentyfikowanie głównych minerałów meteorytu NWA 4560: oliwinów i piroksenów, zarówno piroksenu jednoskośnego (klinoenstatytu, pigeonitu i augitu), jak i ortopiroksenu o dużej zawartości enstatytu. Minerale te są głównymi składnikami chondrytów, w szczególności chondrytów grupy LL. Niektóre minerały meteorytu NWA 4560 zostały stopione podczas kosmicznych kolizji i bardzo szybko wystudzone, dlatego występują w postaci szkliwa, lub tworzą chondry kryptokrystaliczne.



**Rys. 11.** a) Chondra porfirowa piroksenowa (PP) złożona z rombów krysztalów enstatytu i jednoskośnych krysztalów klinoenstatytu. b) Krysztaly klinoenstatytu. Mikroskop polaryzacyjny, polaroidy skrzyżowane. Pole widzenia: (a) 0,6×0,6 mm, b) 0,4×0,22 mm.



**Rys. 12.** Fragment matryks z chondrami i euhedralnymi krysztalami oliwinów i piroksenów. W prawym dolnym rogu widoczna ciemna chondra kryptokrystaliczna (C), a w prawym górnym rogu grupa euhedralnych krysztalów oliwinów i klinopiroksenów, pigeonitu i augitu. Mikroskop polaryzacyjny, polaroidy skrzyżowane. Pole widzenia: 2,2×2,2 mm.

Zgodnie danymi Rubina (Rubin 2000) w chondrytach zwyczajnych (OC) występują następujące teksturalne typy chondr: POP (48% populacji), PP (10%), PO (23%), BO (4%), RP (7%), C (5%) oraz GOP (3%). Nasze wyniki pokazują, że wszystkie teksturalne typy chondr są obecne w meteorycie NWA 4560.

Minerały żelazo-niklu: kamacyt oraz taenit występują w meteorycie NWA 4560 głównie w skale macierzystej, ale również w chondrach w postaci globul, także globul troilitowo-metalicznych, ameboidalnych plamek oraz żyłek. Żyłki metaliczne oraz metaliczno-troilitowe występują w przestrzeniach międzyziarnowych, wewnątrz chondr, w obszarach peryferyjnych chondr oraz wzdłuż linii i sieci spękań. Forma globul i żyłek to także wynik stopienia podczas epizodów zderzeń, tych podobnie jak i troilit łatwo topliwych minerałów. Jednak większość żelaza chondrytu NWA 4560 występuje w postaci utlenionej, związanej chemicznie w oliwinie i piroksenie chondr i matriks.

Żyłki i globule troilitowe obecne w NWA 4560 wewnątrz niektórych chondr (m.in. chondr PO typu II) i skale macierzystej (rys. 8a) mogą być dowodem na ogrzanie kolizyjne i stopienie minerałów niskotemperaturowych tego meteorytu, wskutek przejścia fali uderzeniowej. Troilit FeS jest minerałem o niskiej temperaturze topnienia i łatwiej niż inne minerały ulega stopieniu. Mikroskopowe pęknięcia obecne w NWA 4560 również dowodzą zderzenia, którego doświadczył ten meteoryt. Niektóre żyłki minerałów w meteorytach mogą być skutkiem reakcji chemicznych, metamorfizmu związanego z działaniem wody lub innych czynników aktywnych w środowisku planetoidy macierzystej lub Ziemi.

Chondryt NWA 4560 sklasyfikowano jako należący do grupy LL typu petrologicznego 3.2 (Weisberg 2010; Bunch 2013). W ramach typu petrologicznego 3 wprowadzono podtypy 0-7 reprezentujące różny metamorfizm wodny tej grupy chondrytów. Najmniej przeobrażone są chondryty 3.0, w których krzemiany chondr nie są zmienione, najbardziej zmetamorfizowane są chondryty podtypu 3.7. Podtyp 3.2 oznacza, że NWA 4560 jest względnie mało przeobrażonym chondrytem zwyczajnym.

Meteority należące do tej samej grupy i tego samego typu petrologicznego powinny wykazywać duże podobieństwo w składzie mineralnym i mikrostrukturze. Można zaobserwować podobieństwo mikrostruktury meteorytu NWA 4560 i meteorytów NWA 4967 (CO3.2, Szurgot i in. 2011) oraz Adrar 003 (LL3.2, Brearley i Jones 1998).

Mikrospektroskopia Ramana meteorytu NWA 4560 ujawniła obecność następujących minerałów: oliwinu, ortopiroksenu, klinopiroksenu oraz plagioklazu (Szurgot i in. 2009). Są to te same minerały, które ujawniliśmy za pomocą analitycznej mikroskopii elektronowej i techniki cienkich płytek. Wyniki ramanowskie, po uzupełnieniu i opracowaniu będą przedmiotem oddzielnej publikacji. Wszystkie trzy metody analityczne okazały się bardzo użyteczne w badaniach meteorytu NWA 4560 i uzupełniające się wzajemnie. Zidentyfikowane w NWA 4560 minerały są podstawowymi oraz akcesoryjnymi składnikami chondrytów (Maneck 2004, 2010a,b), także chondrytów grupy LL (Dodd 1981; Norton 2002; Hutchi-

son 2004; Hurnik i Hurnik 2005; Sears 1978, 2004; Brearley i Jones 1998; McSween 1999; Mc Sween i Huss 2010; Scott i Krot 2005).

Meteoryt NWA 4560 to nowy ciekawy materiał pozaziemski. Analityczna mikroskopia elektronowa i mikroskopia optyczna wzbogaciły naszą wiedzę o składzie mineralnym i mikrostrukturze tego chondrytu. Identyfikacja większości minerałów została potwierdzona za pomocą mikrospektroskopii Ramana.

## Wnioski

W meteorycie NWA 4560 zidentyfikowaliśmy minerały typowe dla chondrytów zwyczajnych: oliwin, ortopiroksen, klinopiroksen pigeonit i augit, troilit oraz kamacyt, a także skalenie reprezentowane przez oligoklaz. Zidentyfikowane minerały są utworzone przez 11 pierwiastków: O, Si, Mg, Fe, S, Al, Ca, Ni, Na, Cr oraz C.

W oparciu o położenia i natężenie pików EDS określiliśmy skład oliwinu, klinopiroksenu, ortopiroksenu oraz plagioklaz. Ustaliliśmy, że zawartość fajalitu w oliwinie mieści się w przedziale od 30 do 38% molowych, co oznacza skład  $\text{Fo}_{62-70}\text{Fa}_{30-38}$ .

Zawartość ferrosylitu w klinopiroksenie meteorytu NWA 4560 jest w przedziale 9–32% molowych: ortopirokseny  $\text{Fs}_{9-32}$ , klinopirokseny  $\text{Fs}_{13-17}$ .

Wprowadzono zależność analityczną, która pozwala w oparciu o zawartość atomową tylko dwóch pierwiastków: Na i Ca lub Na i Al (wzór (7)) określić skład plagioklaz. Nasze dane pozwoliły określić średni skład plagioklaz meteorytu NWA 4560 jako  $\text{Ab}_{80}\text{An}_{20}$ , co oznacza, że jest on oligoklazem.

Skład pierwiastkowy i skład mineralny chondr i matriks, obecność, rozmiar i dobra wyrazistość chondr, a także obecność globul i żyłek metalicznych i troilitowych oraz podobieństwo mikrostruktury NWA 4560 do mikrostruktury znanego chondrytu zwyczajnego z grupy LL3.2 Ardar 003 potwierdzają przynależność meteorytu NWA 4560 do chondrytów zwyczajnych LL podtypu petrologicznego 3.2.

**PODZIĘKOWANIA:** Autorzy serdecznie dziękują Profesorowi Andrzejowi Maneckiemu za zainteresowanie przebiegiem badań oraz za Jego cenne, inspirujące uwagi o badaniach meteorytów i prezentacji wyników badań zamieszczonych w tej pracy.

## Literatura

- Barbacki A. (Ed.), 2005, *Mikroskopia elektronowa*, Poznań.
- Biała J., Manecki A., 2011, *Bibliografia Meteorytyki Polskiej (1805–2010)*, Polskie Towarzystwo Meteorytowe, Sosnowiec.
- Brearley A.J., Jones R.H., 1998, *Chondritic meteorites*, [w:] *Planetary Materials*, Papike J.J. (Ed.), *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, Washington D.C. 36, 3-1-3-398.
- Bunch T., 2013, *Northwest Africa 4560*, Meteoritical Bulletin Database, <http://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php>

- Dodd R.T., 1981, *Meteorites - A petrologic-chemical synthesis*, Cambridge.
- Cimała M., 2007, 2013, www.polandmet.com.
- Consolmagno G.J. Britt D.T, Mackie R.J., 2008, *The significance of meteorite density and porosity*, *Chemie der Erde*, 68, 1–29.
- Hurnik B., Hurnik., 2005, *Materia kosmiczna na Ziemi, jej źródła i ewolucja*. Poznań.
- Hutchison R., 2004, *Meteorites-A petrologic, chemical and isotopic synthesis*, Cambridge.
- Krinov E.L., 1960, *Principles of Meteoritics*, Pregamon, New York.
- Maneck A., 2004, *Encyklopedia minerałów z polskim i angielskim słownikiem nazw. Minerality Ziemi i materii kosmiczne*, Kraków.
- Maneck A., 2010a, *Meteority. Oblicza gości z kosmosu*. Kraków.
- Maneck A., 2010b, *Meteorology, meteorology, pramateria słoneczna i „kosmiczne” technologie*, Kraków.
- Mason B., 1962, *Meteorites*, New York.
- McSween H.Y., Jr., 1999, *Meteorites and their parent planets*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- McSween H.Y., Jr., Huss G. R., 2010, *Cosmochemistry*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Norton O.R., 2002, *The Cambridge Encyclopedia of Meteorites*. Cambridge.
- Polański K., 2008, *Analityczna mikroskopia elektronowa w badaniach kryształów*, [w:] *Kryształy w przyrodzie i technice. Przewodnik po świecie kryształów*, Wojtczak L., Ziomek J. (Eds.), Łódź, 173–190.
- Reed S.I.B., 2005, *Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology*, Cambridge.
- Rubin A.E., 2000, *Petrologic, geochemical and experimental constraints on models of chondrule formation*, *Earth Sci. Rev.* 50, 3–27.
- Scott E.R.D., Krot A.N., 2005, *Chondrites and their components*, [w:] *Meteorites, comets, and planets*, A.M. Davis [Ed.], Amsterdam.
- Sears D.W., 1978, *The Nature and Origin of Meteorites*, Bristol.
- Sears D.W., 2004, *The Origin of Chondrules and Chondrites*, Cambridge.
- Szurgot M., 2009, *Badania minerałów meteorytu NWA 4560 techniką płytek cienkich*, 51 Konwersatorium Krystalograficzne, Wrocław, Streszczenia komunikatów, 293–294.
- Szurgot M., Kisiel K., Kisiel R., 2009, *Badania meteorytu NWA 4560 za pomocą spektroskopii Ramana*, 51 Konwersatorium Krystalograficzne, Wrocław, Streszczenia komunikatów, 291–292.
- Szurgot M., Polański K., 2011, *Badania chondrytu NWA 4560 za pomocą analitycznej mikroskopii elektronowej*, 53 Konwersatorium Krystalograficzne, Wrocław, Streszczenia komunikatów, 276–277.
- Wasson J.T., 1985, *Meteorites, their record of early solar system history*, Freeman and Corp., New-York.
- Weisberg M.K., Smith C., Benedix G., Herd C.D.K., Righter K., Haack H., Yamaguchi A., Chennaoui Aoudjehane H., Grossman J.N., 2010, *Meteoritical Bulletin*, 97, MAPS 45(3), 449.