

Marian SZURGOT¹, Krzysztof POLAŃSKI²

Wyniki badań składu pierwiastkowego i mineralnego eukrytu NWA 4039 za pomocą analitycznej mikroskopii elektronowej

Results of investigation of elemental and mineral composition of NWA 4039 eucrite by analytical electron microscopy

Abstract: New NWA 4039 eucrite found in 2005 in Morocco was investigated by scanning electron microscopy. Elemental composition and mineral composition have been analyzed. The composition of feldspars and plagioclases has been determined, and the presence of ilmenite, chromite, troilite and silica confirmed. It was established that the mean elemental composition of NWA 4039 and atomic and molar ratios: $Fe/Mn = 31$, $Na/Al = 0.045$, $Ca/Al = 0.66$ and $Mg/Mg+Fe = 31$ are typical of eucrites, and two main meteorite minerals have the mean composition: pyroxene $En_{30}Fs_{66}Wo_4$ and plagioclase feldspar $An_{91}Ab_9$. Presence of clinopyroxene pigeonite $En_{37}Fs_{55}Wo_8$ and plagioclase $An_{90}Ab_{10}$ and $An_{92}Ab_8$ has been revealed. Mean chemical composition, as well as TiO_2 content (0.59 wt%) vs. FeO/MgO ratio (4.11) indicate that NWA 4039 is a non cumulate, basaltic eucrite.

Keywords: Analytical electron microscopy, extraterrestrial matter, HED meteorites, meteorites

Wstęp

Analityczna mikroskopia elektronowa jest ważnym narzędziem badawczym meteorytów i skał ziemskich. Pozwala określić skład pierwiastkowy, skład mineralny, mikrostrukturę i teksturę skał, a jej połączenie ze spektroskopią ramanowską i mikroskopią optyczną znacznie wzbogaca możliwości badawcze skał pozaziemskich (Reed 2005; Barbacki 2005; Szurgot i in. 2007; Polański 2008; Szurgot i in. 2008a, b; Szurgot i in. 2009a, b; Szurgot 2009; Szurgot i in. 2011).

NWA 4039 to nowy materiał pozaziemski, znaleziony w 2005 roku w zachodniej części Sahary w Maroku. Meteoryt ten w roku 2006 został przez Greshake i Kurza sklasyfikowany jako eukryt (brekcja monomiktyczna), który zawiera: plagioklaz ($An_{88,3-92,6}$), ortopiroksen ($Fs_{58,1-62,2} Wo_{2,7-4,6}$), pigeonit

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

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

(Fs50,7–58,6 Wo5,2–15,7), augit (Fs26,3–34,9 Wo32,1–44,1) i w którym są obecne także: krzemionka, ilmenit, troilit oraz chromit tytanowo-glinowy (Connolly i in. 2006; Greshake i Kurtz 2012). Greshake i Kurtz określili, że meteoryt jest silnie zszokowany i średnio zwietrzały i nazwali go eukrytem niezwykle z dominującą teksturą bazaltową gruboziarnistych piroksenów wapniowych i plagioklazów poprzecinanych centymetrowych rozmiarów pasmami drobniejszych ziaren i pokruszonych kryształów (Greshake i Kurtz 2012). Te wstępne dane wskazują, że jest to ciekawy obiekt pozaziemski, a w literaturze naukowej dotąd brakuje oddzielnej, obszernej publikacji poświęconej temu nowemu achondrytowi.

Naszym zamierzeniem było przeprowadzenie wszechstronnych badań meteorytu NWA 4039 z wykorzystaniem różnych metod analitycznych. Naturalnym było wykorzystanie analitycznej mikroskopii elektronowej. Wstępne wyniki badań eukrytu NWA 4039 uzyskaliśmy wykorzystując mikro-spektroskopię Ramana (Szurgot i Kozanecki 2007, 2009) i analityczną mikroskopię elektronową (Szurgot i in. 2006). Celem tej pracy było określenie i zanalizowanie składu pierwiastkowego i mineralnego meteorytu NWA 4039. Badany okaz meteorytu został zakupiony od Marcina Cimały, znanego kolekcjonera i dealera meteorytów.

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.

Badania prowadzono na okazie meteorytu w postaci wypolerowanej grubej płytki płasko-równoległej o wymiarach 19×13×2 mm (rys. 1).

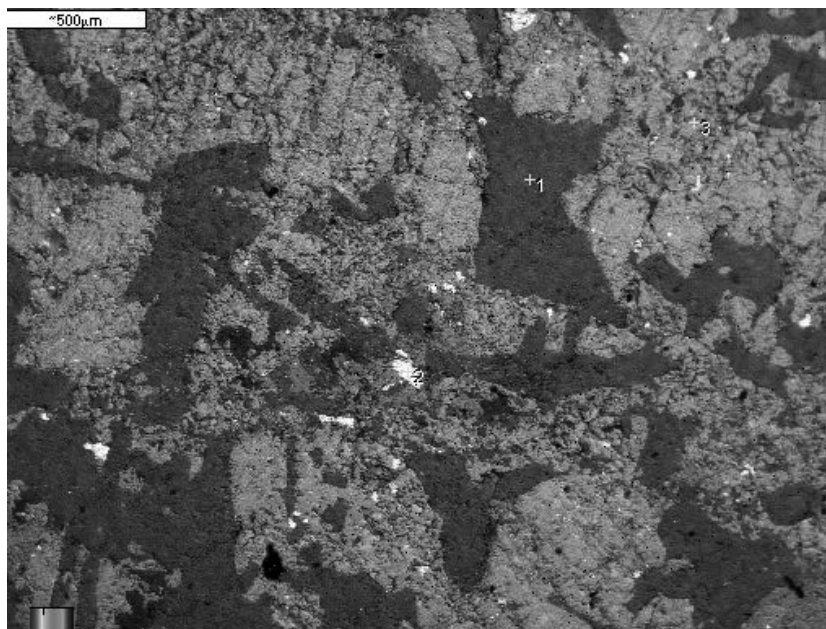
Wyniki

Rysunki 2 i 3 pokazują obrazy BSE meteorytu NWA 4039 ze skaningowego mikroskopu elektronowego. Prezentują one mikrostrukturę bazaltową charakterystyczną dla eukrytów. Ujawniają dominację dwóch minerałów: piroksenu (szary) i plagioklazu (ciemnoszary), a także obecność minerałów akcesorycznych: ilmenitu (biały), chromitu (biały) i krzemionki (czarny).

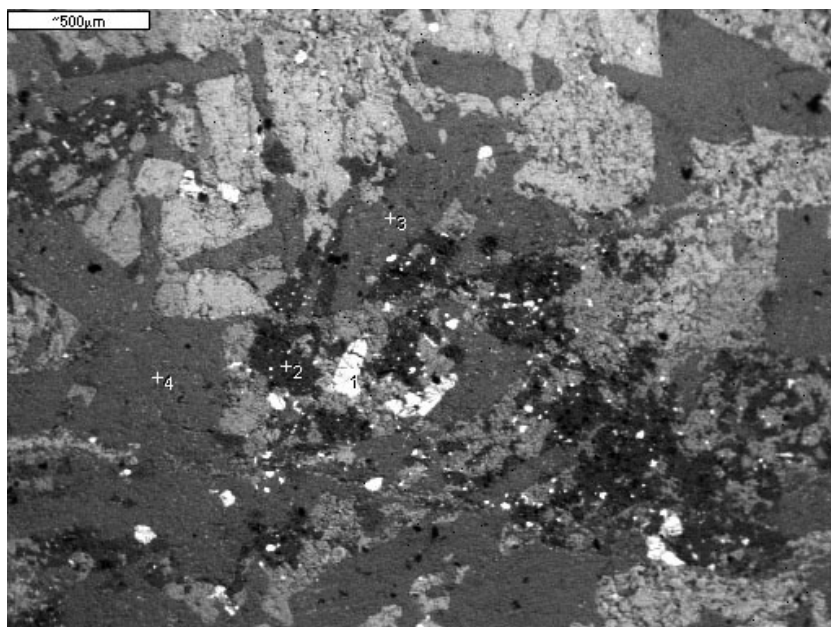
Widma EDS pokazane na rysunkach 4, 5, 6 i 7 ujawniają skład lokalny meteorytu. Widma pochodzą z różnych mikroobszarów tego achondrytu i wykazują obecność typowych dla eukrytów minerałów: klinopiroksenu pigeonitu, plagioklazu, ilmenitu, chromitu i krzemionki. Ujawniają one, że głównymi składnikami eukry-



Rys. 1. Eukryt NWA 4039. Widok meteorytu w świetle widzialnym. Widać dominację piroksenów (szare) i plagioklazów (białe) w achondrycie. Pole widzenia: 22×16 mm.



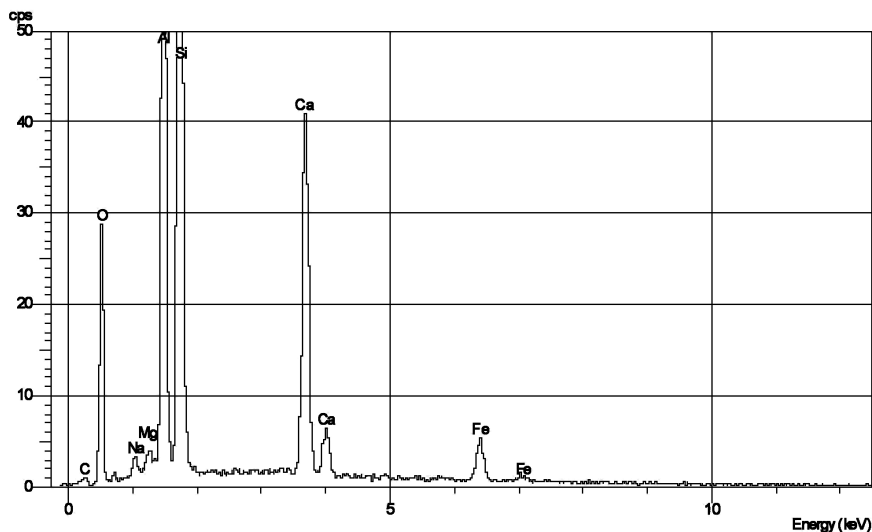
Rys. 2. Obraz BSE eukrytu NWA 4039. Widok mikrostruktury meteorytu ze skaningowego mikroskopu elektronowego. Obraz pokazuje dominację piroksenów i plagioklazów w achondrycie. 1 – plagioklaz An92Ab8, 2 – ilmenit FeTiO₃, 3 – klinopiroksen pigeonit En37Fs55Wo8. Pole widzenia: 3,1×2,2 mm.



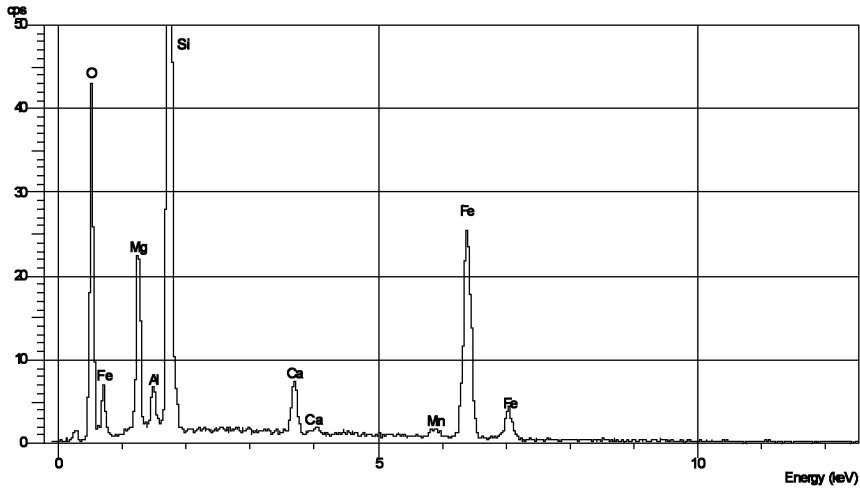
Rys. 3. Obraz BSE innego fragmentu eukrytu NWA 4039. 1 – ilmenit FeTiO_3 , 2 – krzemionka SiO_2 , 3, 4 – plagioklaz $\text{An}_{90}\text{Ab}_{10}$ (obszar szary, ciemniejszy). Pigeonit – obszar jasnoszary. Pole widzenia: $3 \times 2,3$ mm.

tu NWA 4039 są pigeonit i plagioklaz, a inne minerały; ilmenit, chromit i krzemionka są minerałami akcesorycznymi.

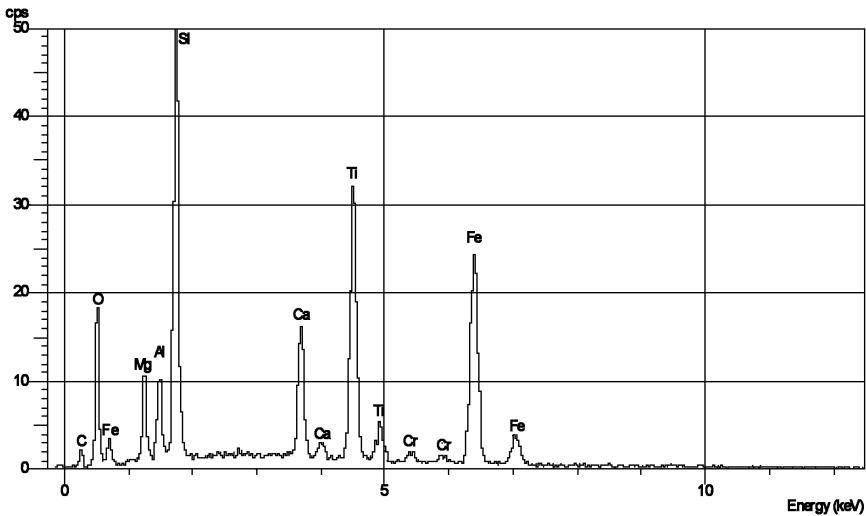
Widmo EDS meteorytu NWA 4039 pokazane na rysunku 8 otrzymano z dużego obszaru meteorytu. Reprezentuje ono średni skład pierwiastkowy achondrytu.



Rys. 4. Widmo EDS z mikroobszaru meteorytu NWA 4039 ujawniające plagioklaz $\text{An}_{92}\text{Ab}_8$. Plagioklaz ten zawiera: FeO (4,35%) i MgO (0,60%).



Rys. 5. Widmo EDS z mikroobszaru meteorytu NWA 4039 ujawniające klinopiroksen pigeonit $\text{En}_{37}\text{Fs}_{55}\text{Wo}_8$. Pigeonit zawiera: Al_2O_3 (2,38%) i MnO (0,99%). Wartości stosunków: $\text{Fe}/\text{Mn} = 30$ i $\text{Fe}/\text{Mg} = 2,2$ świadczy, że NWA 4039 jest eukrytem bazaltowym.



Rys. 6. Widmo EDS z mikroobszaru meteorytu NWA 4039 ujawniające ilmenit FeTiO_3 . Ilmenit zawiera: Al_2O_3 (4,81%), Cr_2O_3 (1,05%), SiO_2 (26,36%) i MgO (5,33%).

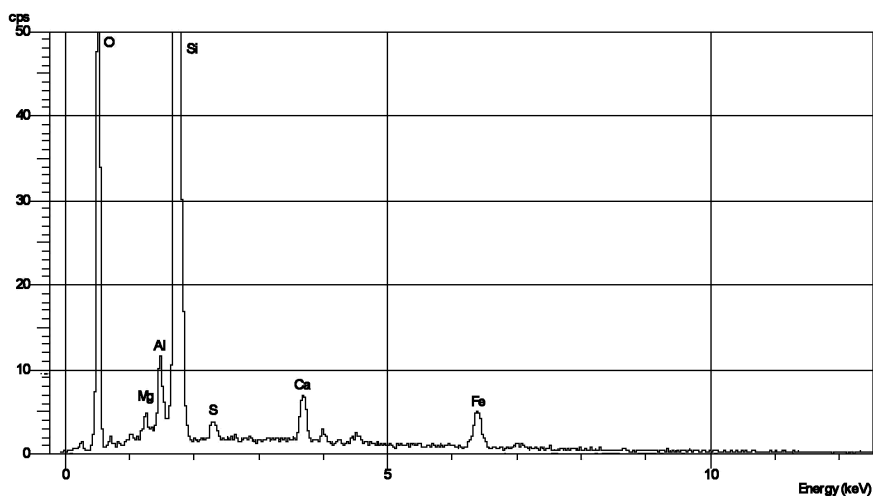
Analiza średniego składu NWA 4039 z wykorzystaniem analitycznej mikroskopii elektronowej pokazuje, że głównymi pierwiastkami tworzącymi materię tego eukrytu są: Si (21,06% wag), O (43,29% wag.), Fe (15,96%), Mg (3,06%), Ca (7,58%) i Al (7,62%), które obejmują 98,6% całego składu mineralnego NWA 4039. Istotnymi składnikami meteorytu o wkładzie łącznym 1,4% są: Ti (0,36%), Cr (0,27%), Mn (0,51) i Na (0,29%) (tabela 1). Lokalnie wykryto także S i inne śladowe pierwiastki.

Tabela 1. Średnia zawartość pierwiastków w meteorycie NWA 4039 i wybranych eukrytach.

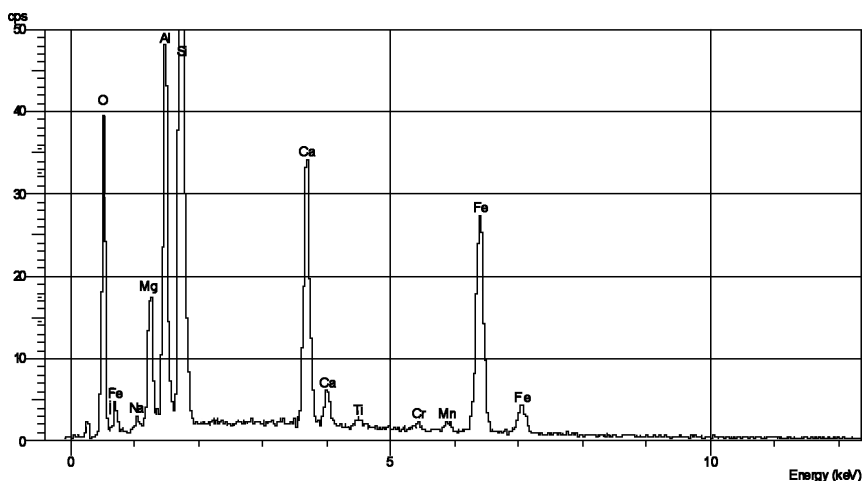
Pierwiastek	NWA 4039	HaH 286 (Szurgot i Polański 2011)	Yamato 74450 (Jochum i in.1980)	Pasamonte (Jochum i in. 1980)	Stannern (Jochum i in. 1980)
O	43,29 (61,86)	45,18* (63,05)	45,5#	44,5#	46,3#
Si	21,06 (17,15)	21,21 (16,86)	22,2	23,7	22,5
Mg	3,06 (2,88)	3,18 (2,92)	4,2	3,9	4,4
Fe	15,96 (6,54)	12,18 (5,12)	13,9	13,4	12,7
S			0,13	0,039	0,42
Al	7,62 (6,46)	7,89 (6,53)	6,3	6,5	6,0
Ca	7,58 (4,33)	8,61 (4,80)	7,0	7,4	7,2
Ni			<0,04	<0,04	<0,04
Na	0,29 (0,29)	0,44 (0,43)	0,27	0,31	0,31
Cr	0,27 (0,12)		0,31	0,14	0,16
Mn	0,51 (0,21)	0,38 (0,15)	0,44	0,37	0,33
K			0,041	0,034	0,037
Ti	0,36 (0,17)	0,30 (0,14)			
Suma	100 (100)	100 (100)	100	100	100

*% wagowe, (%) atomowe. # Zawartość tlenu określono przez uzupełnienie do 100.

Tabela 2 prezentuje skład tlenkowy eukrytu NWA 4039 i skład innych eukrytów, wyrażony w procentach wagowych. NWA 4039 zawiera: SiO_2 (45,06%), MgO (5,07%), FeO (20,53%), Al_2O_3 (14,40%), CaO (10,61%), Cr_2O_3 (0,40%), Na_2O (0,39%), MnO (0,66%) oraz TiO_2 (0,59%). Dane te pokazują, że średni skład pierwiastkowy i skład tlenkowy meteorytu NWA 4039 jest zbliżony do składu wcześniej badanych eukrytów (Mason i in. 1979; Jochum i in., 1980; Mitt-



Rys. 7. Widmo EDS z mikroobszaru meteorytu NWA 4039 ujawniające krzemionkę SiO_2 . Krzemionka zawiera: Al_2O_3 (2,13%), CaO (2,08%), FeO (2,47%), MgO (0,62%), MnO (0,99%) i FeS (1,4%).



Rys. 8. Widmo EDS achondrytu z dużego obszaru meteorytu (2×2 mm) reprezentujące średni skład pierwiastkowy meteorytu.

lefehltd i in. 1998; Barrat i in. 2000; Hutchison 2004; Yamaguchi i in. 2009). Zawartość większości pierwiastków, takich jak: O, Si, Mg, Al, Ca, Cr, Na, Mn i Ti jest bliska innym eukrytom. Nasza analiza nie wykazuje S, Ni i K obecnych w innych eukrytach (tabela 1). Skład tlenkowy również dokumentuje ten sam zakres wartości wykrytych tlenków, przy czym zawartość MgO jest trochę poniżej, a zawartość MnO trochę powyżej tych spotykanych w eukrytach. FeO jest względnie wysoka, bliska górnych wartości spotykanych u eukrytów.

Tabela 2. Średni skład tlenkowy* meteorytu NWA 4039 i wybranych eukrytów. Zawartość tlenków podano w% wagowych.

Tlenek	NWA 4039	Sioux County	Stannern	Nuevo Laredo	Serra de Mage	3 eukryty ^{##} kumulaty	14 eukrytów* nie kumulaty
SiO ₂	45,06	49,2 [#]	49,7 [#]	49,5 [#]	48,5 [#]		
MgO	5,07	6,88	6,97	5,55	10,7	8,54–6,01 ^{##}	6,16–7,77*
FeO	20,53	18,4	17,8	19,6	14,4	15,57–19,76	18,28–21,62
S	nd	0,07	nd	nd	0,15	nd	nd
Al ₂ O ₃	14,40	13,1	12,3	12,2	14,8	6,86–14,77	11,19–14,41
CaO	10,61	10,4	10,7	10,3	9,75	5,87–9,80	9,99–11,12
Na ₂ O	0,39	0,41	0,62	0,51	0,25	0,25–0,45	0,21–0,59
Cr ₂ O ₃	0,40	0,32	0,34	0,28	0,63	0,41–0,82	0,24–0,38
MnO	0,66	0,55	0,53	0,58	0,48	0,45–0,63	0,48–0,60
K ₂ O	nd	0,03	0,07	0,05	0,01	nd	nd
P ₂ O ₅	nd	nd	0,10	nd	0,03	nd	nd
TiO ₂	0,59	0,58	0,98	0,83	0,13	0,17–0,43	0,54–1,07

[#] Dane Hutchisona (Hutchison 2004).

^{##} oraz * Dane Barrata i współpr. otrzymane dla 17 eukrytów (Barrat i in. 2000).

^{##} kumulaty (3 eukryty), * nie kumulaty (14 eukrytów). nd – nie wykryto.

Ostatnie dwie kolumny tabeli 2 wskazują, że NWA 4039 jest eukrytem bazaltowym, nie kumulatem. Zawartość TiO_2 (0,59%) i wartość stosunku FeO/MgO (4,11 stosunek wagowy) pozwala stwierdzić, zgodnie z ustaleniami literaturowymi (Barrat i in. 2000), że NWA 4039 należy faktycznie do grupy eukrytów bazaltowych, nie kumulatów (rys. 9). Jest widocznym, że punkt 0,59% (4,11), charakteryzujący NWA 4039, leży blisko linii trendu zaobserwowanej dla grupy eukrytów Nuevo Laredo, tj. dla eukrytów wzbogaconych w nie mieszalne pierwiastki i wyższy stosunek $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ (rys. 9). NWA 4039 wykazuje wprawdzie zawartość TiO_2 (0,59% wag) z zakresu eukrytów bazaltowych grupy głównej (MG), zajmującej obszar wokół punktu spotkania linii trendów eukrytów grup Stannern i Nuevo Naredo, dla których przedział TiO_2 to 0,5–0,8% wag, ale eukryty grupy głównej mają niższą wartość stosunku $\text{FeO}^*/\text{MgO} = 2,4\text{--}2,5$ (Barrat i in. 2000). NWA 4039 należy więc prawdopodobnie do eukrytów grupy Nuevo Laredo.

Ważnym etapem badań nowych meteorytów jest analiza wybranych stosunków zawartości pierwiastków. Stosunki atomowe pierwiastków: Fe/Mn , Ca/Al oraz Na/Al w meteorycie NWA 4039, jak również stosunki $\text{mg}\#$, $\text{fe}\#$ oraz mg zostały przez nas określone i zamieszczone w tabeli 3. Stosunki $\text{mg}\#$, $\text{fe}\#$ i mg obliczono wykorzystując definiujące je wzory:

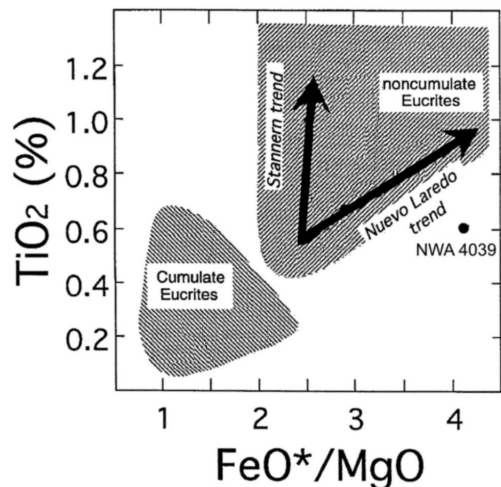
$$\text{mg}\# = 100 \text{ Mg}/[\text{Mg}+\text{Fe}], \quad (1)$$

$$\text{fe}\# = 100 \text{ Fe}/[\text{Mg}+\text{Fe}], \quad (2)$$

$$\text{mg} = 100 \text{ Mg}/[\text{Mg}+\text{Fe}+\text{Ca}], \quad (3)$$

gdzie Mg , Fe i Ca to zawartość magnezu, żelaza oraz wapnia w meteorycie wyrażona w procentach atomowych.

Wyniki zamieszczone w tabeli 3 dla eukrytu NWA 4039 i określone także dla innych eukrytów pokazują, że pomimo nieznacznych różnic w bezwzględnej zawartości pierwiastków, stosunki atomowe pierwiastków meteorytu NWA 4039 są bardzo zbliżone do stosunków zawartości pierwiastków w eukrytach (Hutchison 2004; Szurgot i Polański 2011; McSween i in. 2010; McSween i Huss 2010).



Rys. 9. Wykres zawartości TiO_2 od stosunku FeO^*/MgO dla eukrytów pokazujący dwa obszary charakterystyczne dla grup eukrytów: kumulatów i nie kumulatów (Barrat i in. 2000). Nasz punkt pomiarowy dla NWA 4039 (0,59% wag. TiO_2 , stosunek FeO^*/MgO równy 4,11) ujawnia, że NWA 4039 jest eukrytem niekumulatowym i leży blisko linii trendu zaobserwowanej dla grupy eukrytów Nuevo Laredo, tj. eukrytów wzbogaconych w nie mieszalne pierwiastki i wyższy stosunek $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$. FeO^* oznacza sumę zawartości FeO oraz Fe .

Tabela 3. Stosunki atomowe zawartości pierwiastków w NWA 4039 i w eukrytach.

Stosunek	NWA 4039	HaH 286*	Eukryty (Hutchison, 2004)	Yamato 74450 (Jochun i in. 1980)	Pasamonte (Jochun i in. 1980)	Stannern (Jochun i in. 1980)
Fe/Mn	31	34	30–33	31 ¹⁾	36 ¹⁾	38 ¹⁾
mg#	31	36		41	40	44
fe#	69	64		59	60	56
mg	21	23		29	27	31
Ca/Al	0,67	0,73	0,72–0,79	0,75	0,77	0,81
Na/Al	0,045	0,066		0,050	0,056	0,061

mg# = 100 Mg/[Mg+Fe]; fe# = 100 Fe/[Mg+Fe]; mg = 100 Mg/[Mg+Fe+Ca].

¹⁾ Dane dla Yamato 74450, Pasamonte i Stannern obliczono z zawartości wagowej pierwiastków.

* Dane Szurgota i Polańskiego (Szurgot i Polański 2011).

Tabela 4. Skład plagioklazów i piroksenów w eukrycie NWA 4039.

Minerał	NWA 4039	NWA 4039 (Connolly i in. 2006)
Plagioklaz	An91Ab9*	
	An92Ab8 An90Ab10	
	An90Ab10	
	An90-92Ab8-10 [#]	An88.3–92.6 [#]
Piroksen	En30Fs66Wo4*	
Pigeonit (Cpx)	En37Fs55Wo8	Fs50.7–58.6 Wo5.2–15.7 [#]
Augit (Cpx)		Fs26.3–34.9 Wo32.1–44.1 [#]
Ortopiroksen		Fs58.1–62.2 Wo2.7–4.6 [#]

* – skład średni, # – zakres składu.

Analiza średniej zawartości pierwiastków i tlenków pokazuje, że pirokseny i plagioklasy stanowią około 96–97% masy achondrytu NWA 4039, ilmenit (FeTiO₃) 1,1% masy, chromit (FeCr₂O₄) 0,6% masy, krzemionka (SiO₂) i troilit (FeS) łącznie około 1–2% masy meteorytu. Wynika to z faktu, że pierwiastki: Fe, Mg, Si, O, Ca, Al i Na stanowią około 99% (wagowych i atomowych) meteorytu NWA 4039 (tabela 1). Dlatego ubogi w wapń klinopiroksen pigeonit (Mg,Fe,Ca)₂[Si₂O₆] oraz skaień sodowo-wapniowy, plagioklaz NaAlSi₃O₈-CaAl₂Si₂O₈ o wysokiej zawartości anortytu (An) CaAl₂Si₂O₈ i niskiej zawartości albitu (Ab) NaAlSi₃O₈ dominują w tym meteorycie. Dominacja piroksenu i plagioklazu w NWA 4039 jest widoczna przy porównaniu trzech widm EDS: widma pigeonitu (rys. 5), widma plagioklazu (rys. 4) i widma reprezentującego średni skład meteorytu NWA 4039 (rys. 8). Średni skład pierwiastkowy i tlenkowy dowodzi także obecności ilmenitu FeTiO₃, chromitu FeCr₂O₄, troilitu (FeS) i krzemionki (SiO₂), które zostały wykryte jako minerały akcesoryczne. O obecności ortopiroksenu (Mg,Fe)₂[Si₂O₆] w achondrycie NWA 4039 świadczy średni skład piroksenu En30Fs66Wo4, gdzie En to enstatyt Mg₂[Si₂O₆], Fs to ferrosilit

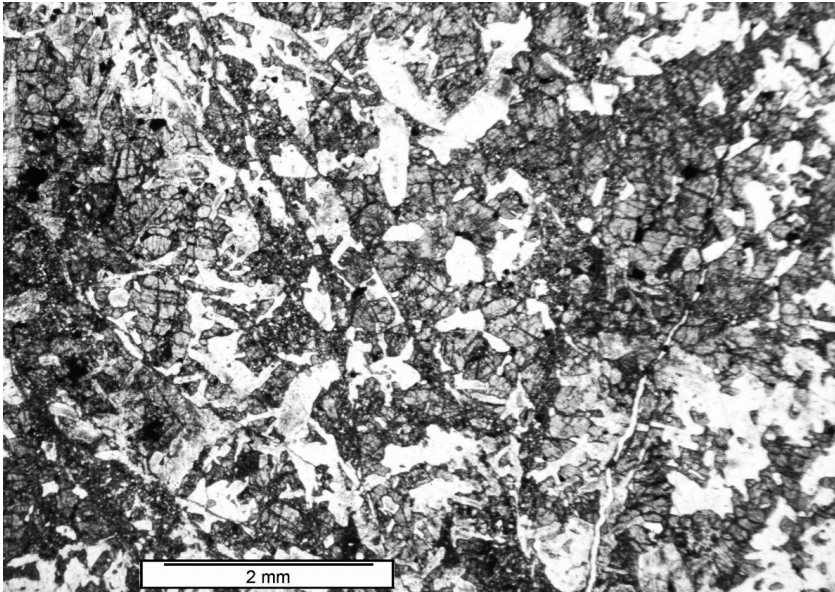
$\text{Fe}_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$, a Wo to wollastonit $\text{Ca}_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$ (tabela 4). Średnia zawartość wollastonitu 4% mol. w piroksenie dowodzi struktury rombowej piroksenu, ponieważ przy wyższej zawartości wollastonitu, 5–15% molowych piroksen krystalizuje w strukturze jednoskośnej i jest określany jako klinopiroksen pigeonit.

Tabela 4 prezentuje skład plagioklazu i piroksenu wykrytych przez nas w meteorycie NWA 4039 oraz wykrytych i określonych w meteorycie NWA 4039 przez Greshake i Kurza (Greshake i Kurz 2012; Connolly i in. 2006). Zgodność dla składu plagioklazu i pigeonitu jest zadowalająca. Nasze wyniki pokazują zakres zawartości anortytu w plagioklazie An90–92, a dane literaturowe An88,3–92,6 (Connolly i in. 2006). Zakres zawartości An w plagioklazie mieści się w zakresie eukrytów bazaltowych An73–96 (Mayne i in. 2009; McSween i in. 2010), ale jest on stosunkowo wąski i bliski górnym wartościom dla tej grupy eukrytów. Ten zakres anortytu mieści się także w zakresie kumulatów, dla których An91–96 (Mittlefehldt i in. 1998). To może oznaczać, że w oparciu o te dane nie można wykluczyć przynależności NWA 4039 do grupy kumulatów. Tabela 4 pokazuje, że skład pigeonitu określony przez nas jako En37Fs55Wo8 (55% mol ferrosilitu 8% mol wollastonitu) mieści się w zakresie podanym przez Greshake i Kurza Fs50,7–58,6 Wo5,2–15,7 (50,7–58,7% mol ferrosilitu i 5,2–15,7% mol wollastonitu).

Przynależność achondrytu NWA 4039 do eukrytów bazaltowych, a nie do eukrytów kumulatowych wynika także z analizy stosunków molowych Fe/Mn oraz Fe/Mg w jego piroksenach. Średni skład piroksenu (En30Fe66Wo4) daje wartości Fe/Mn = 31 i Fe/Mg = 2,2, natomiast pigeonitu En37Fs55Wo8 wartości Fe/Mn = 30, Fe/Mg = 1,5. Zgodnie z danymi Mayne i współpracowników te wartości są ulokowane w obszarze eukrytów bazaltowych (wykres zależności Fe/Mn od Fe/Mg pokazany na rysunku 6a w pracy Mayne i in. 2009).

Także zawartość domieszek w minerałach meteorytu NWA 4039 świadczy o tym, że NWA 4039 jest eukrytem bazaltowym. Ilmenit w NWA 4039 zawiera 1,05% Cr_2O_3 i 5,33% MgO, a te wartości mieszczą się w zakresie eukrytów bazaltowych: 0–5,5% Cr_2O_3 , i 0,3–5,2% MgO (Mayne i in. 2009). Pigeonit w NWA 4039 zawiera 2,38% Al_2O_3 i 0,99% MnO, a piroksen ubogi w wapń z eukrytów bazaltowych zawiera 0,09–0,56% Al_2O_3 i 0,83–1,47% MnO (Mayne i in. 2009), dane eukrytów bazaltowych antarktycznych wykazują zakres: 0,09–1,03% Al_2O_3 i 0,91–1,11% MnO (Yamaguchi i in. 1997). Plagioklaz z NWA 4039 zawiera 3,5–4,4% FeO i 0,60–1,32% MgO, a plagioklaz z eukrytów bazaltowych zawiera 0,06–0,92% FeO i 0,02–0,06% MgO (Mayne i in. 2009). Dane te wskazują, że zawartość FeO i MgO w plagioklazie oraz zawartość Al_2O_3 w pigeonicie meteorytu NWA 4039 są wyższe niż w innych eukrytach bazaltowych, ale domieszki ilmenitu Cr_2O_3 i MgO oraz domieszka MnO w pigeonicie mieszczą się w zakresie eukrytów bazaltowych.

Mikrostruktura meteorytu NWA 4039 obserwowana pod skaningowym mikroskopem elektronowym jest prezentowana na rysunkach 2 i 3, a pod mikroskopem optycznym polaryzacyjnym na rysunku 10. Już pod małym powiększeniem widać charakterystyczne elementy mikrostruktury i dominację kryształów piroksenu i plagioklazu, głównych minerałów tego meteorytu. Na obrazach BSE ten sam sto-



Rys. 10. Eukryt NWA 4039. Widok mikrostruktury meteorytu z mikroskopu optycznego uzyskany w płytce cienkiej w świetle widzialnym, przechodzącym, spolaryzowanym liniowo. W torze wiązki światła jest jeden polaryzator umieszczony przed płytką cienką meteorytu. Obraz pokazuje dominację piroksenów (kryształy brązowawe z wyraźnie zaznaczonymi liniami spękań) i plagioklazów (kryształy białe) w achondrycie. Kryształy czarne to ilmenit i chromit. Pole widzenia: 8×2,8 mm.

pień szarości odpowiada tej samej, średniej masie atomowej danego minerału. Kolory ciemne na obrazach BSE reprezentują minerały o niskiej średniej masie atomowej, a kolory jasne ujawniają wysoką masę atomową minerału. Widać, że średnia masa atomowa pigeonitu (kolor jasnoszary) jest wyższa niż plagioklazu (kolor ciemnoszary). Kolor czarny krzemionki wskazuje niską, a kolor biały ilmenitu i chromitu wysoką średnią masę minerału. Niestety nie możemy rozróżnić w tym meteorycie klinopiroksenu i ortopiroksenu, co być może jest spowodowane ich zbliżonym składem chemicznym.

Meteoryty należące do tej samej grupy wykazują duże podobieństwo w składzie mineralnym i w mikrostrukturze. Zarówno obrazy BSE (rys. 2 i 3) jak i obrazy optyczne (rys. 1 i 10) ujawniają strukturę bazaltową meteorytu NWA 4039 typową dla eukrytów (por. Takeda 1997; Takeda i in. 1997; Stolper 1997; Yamaguchi i in. 1997; Mittlefehldt i in. 1998; McSween 1999; Norton 2002; Hutchison 2004; Mayne i in. 2009; McSween i in. 2010).

Nieinwazyjne badania metodą mikrospektroskopii Ramana eukrytu NWA 4039 pozwoliły zidentyfikować główne minerały meteorytu: klinopiroksen i plagioklaz o dużej zawartości anortytu (Szurgot i Kozanecki 2009). Badania minerałów eukrytu NWA 4039 pod mikroskopem optycznym w świetle spolaryzowanym ujawniły kryształy: plagioklazu i pigeonitu (rys. 10) oraz kryształy oliwinu (Szurgot i Kozanecki 2007, 2009). Badania tymi metodami są kontynuowane, a wyniki po uzupełnieniu będą przedmiotem oddzielnej publikacji.

Analityczna mikroskopia elektronowa, mikrospektroskopia Ramana i technika płytek cienkich pokazują, że zidentyfikowane w NWA 4039 minerały są podstawowymi oraz akcesoryjnymi składnikami eukrytów (Sears 1978, 2004; Mittlefehldt i in. 1998; McSween 1999; Hutchison 2004; Manecki 2004; Mayne i in. 2009, Manecki 2010a, b; McSween i in. 2010).

Analityczna mikroskopia elektronowa umożliwiła dokonanie identyfikacji minerałów nowego achondrytu NWA 4039, określenia rozkładu przestrzennego minerałów i zarejestrowania jego mikrostruktury. Ujawnione w niniejszej pracy cechy charakterystyczne mikrostruktury meteorytu NWA 4039, skład pierwiastkowy i skład mineralny tego meteorytu są typowe dla eukrytów bazaltowych i są w większości zgodne z danymi literaturowymi zebranymi dla wcześniej odkrytych i eukrytów.

Wnioski

W meteorycie NWA 4039 zidentyfikowaliśmy następujące minerały: plagioklaz, klinopiroksen pigeonit, ilmenit, chromit, troilit i krzemionkę, a średnia zawartość wollastonitu w piroksenie (Wo₄) wskazuje na występowanie także ortopiroksenu. Skład głównych minerałów meteorytu NWA 4039: pigeonitu i plagioklazu jest zgodny z danymi literaturowymi.

Szczegółowej analizie poddaliśmy średni skład pierwiastkowy, skład tlenkowy i stosunki atomowe zawartości pierwiastków. Zarówno skład pierwiastkowy, skład tlenkowy jak i stosunki atomowe zawartości pierwiastków ($Fe/Mn = 31$, $Na/Al = 0,045$, $Ca/Al = 0,66$ i $Mg/Mg+Fe = 31$), dowodzą, że NWA 4039 jest eukrytem bazaltowym, nie kumulatem.

Innymi wskaźnikami przemawiającymi za tą klasyfikacją jest zadowalająca zgodność składu plagioklazu i pigeonitu zarówno z danymi literaturowymi dla eukrytów bazaltowych, jak i z wcześniejszymi danymi dotyczącymi NWA 4039. Nasze wyniki pokazują zakres zawartości anortytu w plagioklazie An_{90–92}, dane Greshake i Kurza (2012) dla NWA 4039 zawartość An_{88–93}, a dane dla eukrytów bazaltowych zawartość An_{73–96}. Jednak anortytowy wskaźnik nie wyklucza przynależności NWA 4039 do grupy kumulatów, ponieważ zakres zawartości anortytu w plagioklazie kumulatów wynosi An_{91–96}. Zawartość ferrosilitu (Fs) i wollastonitu (Wo) określona przez nas w pigeonicie NWA 4039 Fs₅₅Wo₈ mieści się w zakresie podanym dla NWA 4039 przez Greshake i Kurza (2012) Fs_{51–59}Wo_{5–16}. Analiza zawartości domieszek w ilmenicie, plagioklazie i w piroksenach naszego okazu NWA 4039 uzupełnia dowody na to, że reprezentuje on eukryty bazaltowe.

Analiza stosunków molowych Fe/Mn oraz Fe/Mg w piroksenach NWA 4039 dostarcza jeszcze jednego, przekonującego dowodu na przynależność tego achondrytu do eukrytów bazaltowych, a nie do eukrytów kumulatowych. Średni skład piroksenu (En₃₀Fe₆₆Wo₄) daje wartości Fe/Mn = 31 i Fe/Mg = 2,2, natomiast pigeonitu En₃₇Fs₅₅Wo₈ wartości Fe/Mn = 30, Fe/Mg = 1,5. Zgodnie z danymi Mayne i współpracowników te wartości są ulokowane w obszarze eukrytów bazaltowych.

Analityczna mikroskopia elektronowa i mikroskopia optyczna ujawniły strukturę bazaltową eukrytu NWA 4039. Mikrostruktura i tekstura meteorytu, a także szokowe i wietrzeniowe ziemskie przemiany minerałów będą przedmiotem naszych przyszłych badań za pomocą mikroskopii optycznej, polaryzacyjnej.

Skład pierwiastkowy i skład mineralny achondrytu NWA 4039 oraz podobieństwo mikrostruktury NWA 4039 do mikrostruktury eukrytów dowodzą przynależności tego achondrytu do eukrytów bazaltowych, nie kumulatów.

Podziękowania

Autorzy serdecznie dziękują Panu Profesorowi Andrzejowi Maneckiemu za zainteresowanie przebiegiem badań, za wnikliwą analizę wyników i prezentacji wyników oraz za cenne, inspirujące rady dotyczące przyszłych badań meteorytów.

Literatura

- Barbacki A. (Ed.), 2005. *Mikroskopia elektronowa*. Poznań.
- Barrat J.A., Blichert-Toft J., Gillet P.H., Keller F., 2000. *The differentiation of eucrites: the role of in-situ crystallization*. *Meteoritics & Planetary Science*, 35, 1087–1100.
- Cimała M., 2006. www.polandmet.com
- Connolly H.C. Jr, Zipfel J., Grossman J.N., Folco L., Smith C., Jones R.H., Righter K., Zolensky M., Russel S.S., Benedix G.K., Yamaguchi A., Cohen B.A., 2006. *Meteoritical Bulletin* 90, MAPS, 41 (9), 1383–1418.
- Greshake A., Kurz, M., 2012. *Northwest Africa 4039*. *Meteoritical Bulletin Database*. <http://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php>
- Hutchison R., 2004. *Meteorites – a petrologic, chemical and isotopic synthesis*. Cambridge.
- Johum K.P., Grais K.I., Hintenberger R.H., 1980. *Chemical composition and classification of 19 Yamato meteorites*. *Meteoritics*, 15, 31–39.
- Maneck A., 2004. *Encyklopedia minerałów z polskim i angielskim słownikiem nazw. Minerality Ziemi i materii kosmicznej*. Kraków.
- Maneck A., 2010a. *Meteory, meteoryty, pramateria słoneczna i „kosmiczne” technologie*. Kraków.
- Maneck A., 2010b. *Meteoryty. Oblicza gości z kosmosu*. Kraków.
- Mason B., Jarosevich E., Nelen J.A., 1979. *The pyroxene-plagioclase achondrites*. *Smiths. Contrib. Earth Sci.*, 22, 27–45.
- Mayne R.G., McSween H.Y., McCoy T.J., Gale A., 2009. *Petrology of the unbrecciated eucrites*. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 73, 794–819.
- McSween Jr. H.Y., Mittlefehldt D.W., Beck A.W., Mayne R.G., McCoy T.J., 2010. *HED meteorites and their relationship to the geology of Vesta and the Dawn mission*. *Space Sci Rev.* DOI 10.1007/s11214-010-9637-z.
- McSween H.Y., Jr., Huss G. R., 2010. *Cosmochemistry*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- McSween H.Y., Jr., 1999. *Meteorites and their parent planets*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Mittlefehldt D.W., McCoy T.J., Goodrich C.A., Kracher A., 1998. *Non-chondritic meteorites from asteroidal bodies*. [in:] Papike J.J. (ed.), *Planetary materials, Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, Mineralogical Soc. America, Washington D.C. 36. 4.1–4.195.

- Norton O.R., 2002. *The Cambridge encyclopedia of meteorites*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK.
- Polański M., 2008. *Analityczna mikroskopia elektronowa w badaniach kryształów*. [w:] *Kryształy w przyrodzie i technice. Przewodnik po świecie kryształów*. Łódź, 173–190.
- Reed S.I.B., 2005. *Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology*. Cambridge.
- Sears D.W., 1978. *The Nature and Origin of Meteorites*. Bristol.
- Sears D.W., 2004. *The Origin of Chondrules and Chondrites*. Cambridge.
- Stolper E., 1977. *Experimental petrology of eucritic meteorites*. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 41, 587–611.
- Szurgot M., 2009. *Badania ureilitu NWA XXX za pomocą analitycznej mikroskopii elektronowej*. *Acta Societatis Meteoriticae Polonorum*, 1. 137–141.
- Szurgot M., Polański K., Kozanecki M., 2007a. *Kompleksowe zastosowanie metod analitycznych do badań chondrytów*. *Materiały III Seminarium Meteorologicznego Olsztyn 2005*, Sosnowiec. 93–98.
- Szurgot M., Kozanecki M., 2007. *Zastosowanie spektroskopii Ramana i techniki płytek cienkich w badaniach minerałów meteorytu NWA 4039*. 49 *Konwersatorium Krystalograficzne, Wrocław*, Streszczenia komunikatów, 136–137.
- Szurgot M., Kozanecki M., 2009. *Spektroskopia Ramana w badaniu meteorytów NWA 4039 i NWA 1465*. *Acta Societatis Meteoriticae Polonorum*, 1. 151–155.
- Szurgot M., Polański K., Jakubas A., 2006. *Analityczna mikroskopia elektronowa w badaniach minerałów eukrytu NWA 4039*. 48 *Konwersatorium Krystalograficzne, Wrocław*, Streszczenia komunikatów, 204–205.
- Szurgot M., Polański K., Krystek M. 2008a. *Electron and optical microscopy studies of extraterrestrial minerals in NWA 4047 meteorite*. *Cryst. Res. Technol.*, 43. 656–665.
- Szurgot M., Roźniakowski K., Wojtatowicz T.W., Polański K., 2008b. *Investigation of microstructure and thermophysical properties of Morasko iron meteorites*. *Cryst. Res. Technol.*, 43. 921–930.
- Szurgot M., Kisiel, K., Kisiel R., 2009a. *Micro-Raman spectroscopy of NWA 4047 meteorite*. *Proc. Conf. on Micro-Raman Spectroscopy and Luminescence Studies in the Earth and Planetary Sciences, Mainz*, Gucsik A. (Ed.), *AIP Proceedings* 1163. 155–160.
- Szurgot M., Polański K., Burski M., 2009b. *Microscopic investigations of Shisr 007 meteorite*. *Sci. Bull. Techn. Univ. Lodz, No 1057, Physics*, 30. 73–83.
- Szurgot M., Polański K., Kosiński J.W., 2011. *Microscopic studies of Al Haggounia 001 meteorite*. *Sci. Bull. Techn. Univ. Lodz, No 1105, Physics*, 32. 65–74.
- Szurgot M., Polański K., 2011. *Investigations of HaH 286 eucrite by analytical electron microscopy*. *Meteorites*, 1. Submitted.
- Takeda H., 1997. *Mineralogical records of early planetary processes on the howardite, eucrite, diogenite parent body with reference to Vesta*. *Meteoritics & Planetary Science*, 32, 841–853.
- Takeda H., Ishi T., Arai T., Miyamoto M., 1997. *Mineralogy of the Asuka 87 and 88 eucrites and crustal evolution of the HED parent body*. *Antarct. Meteorite Res.*, 10, 401–413.
- Yamaguchi A., Taylor G.J., Keil K., 1997. *Shock and thermal history of equilibrated eucrites from Antarctica*. *Antarct. Meteorite Res.*, 10, 415–436.
- Yamaguchi A., Barrat J.A., Greenwood R.C., Shirai N., Okamoto C., Setoyanagi T., Ebihara M., Franchi I.A., Bohn M., 2009. *Crustal partial melting on Vesta: Evidence from highly metamorphosed eucrites*. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 73. 7162–7182.