

Marian SZURGOT¹, Renata KISIEL², Krzysztof KISIEL²

Identyfikacja minerałów meteorytu NWA 4505 za pomocą spektroskopii Ramana

Identification of minerals of NWA 4505 meteorite by Raman spectroscopy

Abstract: Ordinary chondrite NWA 4505 was investigated by confocal Raman micro-spectroscopy. Olivine (Fa₀₋₂₂), orthopyroxene (Fs₆₋₂₆), anorthoclase, HT plagioclase, whitlockite, graphite and diamond have been identified. Olivine and orthopyroxene are common and exhibit wide range of Raman shift. Distributions of Raman peaks for olivines and pyroxenes have been analyzed. Narrow, well defined bands of low Ca pyroxenes and olivines indicate on the high structural order and on the high petrologic type of chondrite. The wide range of Fa content in olivine and Fs in pyroxene may indicate that NWA 4505 is an unequilibrated ordinary chondrite.

Keywords: Confocal Raman micro-spectroscopy, extraterrestrial matter, meteoritic diamond, NWA 4505

Wstęp

Mikrospektroskopia Ramana jest współczesną techniką analityczną stosowaną w badaniach minerałów, skał, stopów i kompozytów. Spektroskopia Ramana należy do spektroskopii rozproszeniowych, jest techniką optyczną. Rozpraszanie ramanowskie jest procesem nieelastycznego, zmieniającego długość fali, rozpraszania fotonów na atomach i cząsteczkach. Jest to efekt bardzo słaby, wynika z istnienia oscylacyjnych poziomów energetycznych w materii. Spektroskopia ramanowska umożliwia określenie składu chemicznego, formy krystalicznej, stopnia uporządkowania, rozkładu przestrzennego naprężeń oraz oddziaływań międzycząsteczkowych w badanym materiale. Technika tą bada się substancje stałe, ciekłe oraz gazowe. Mineral oświetla się monochromatycznym promieniowaniem lasera. Dzięki zjawisku Ramana w widmie światła rozproszonego pojawiają się linie, które nie występują w świetle padającym, a ich liczba i położenie zależą od budowy wewnętrznej cząsteczek substancji rozpraszającej, pobudzanych do drgań przez pole

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

² Katedra Fizyki Molekularnej Politechniki Łódzkiej, Żeromskiego 116, 90-924 Łódź

promieniowania (Stucki i Reusser 1999). Fotony światła rozproszonego niosą informacje o energiach przejść oscylacyjnych i rotacyjnych w materii, co umożliwia identyfikację i charakteryzację minerałów.

Widmo Ramana to zależność natężenia promieniowania od częstotliwości tego promieniowania reprezentowanej przez przesunięcie ramanowskie. Przesunięcie ramanowskie jest określone przez różnicę odwrotności długości fali padającej i długości fali rozproszonej i jest mierzone w cm^{-1} . Widmo Ramana to widmo oscylacyjno-rotacyjne niosące informacje o strukturze badanej substancji. Każdy minerał ma unikalne widmo ramanowskie pozwalające na jego identyfikację i charakteryzację. Widma minerałów znanych są zapisywane i umieszczane w bazach widm ramanowskich (Stucki i Reusser 1999, Gillet 2002, Smith i Dent 2005). Dane literaturowe i nasze dotychczasowe wyniki badań minerałów w meteorytach metodą spektroskopii ramanowskiej potwierdzają dużą użyteczność tej techniki w analizie materii pozaziemskiej (Szurgot et al. 2006; Szurgot et al. 2007; Gucsik et al. 2008; Karczemka et al. 2007; Jakubowski et al. 2009; Szurgot i Kozanecki 2009; Szurgot et al. 2009 a, b; Szurgot 2009; Karczemka 2010; Jakubowski 2010; Szurgot i Tszedel 2011; Szurgot i Tomasiak 2013).

Celem niniejszej pracy było zidentyfikowanie minerałów meteorytu NWA 4505 znalezione w 2006 roku w północno-zachodniej Afryce. Meteoryt ten został wstępnie sklasyfikowany przez Marcina Cimałę jako chondryt zwyczajny typu L4 (Cimała 2007). Nazwa meteorytu NWA 4505 jest nazwą tymczasową. Meteoryt NWA 4505 nie był wcześniej badany. Skład pierwiastkowy tego meteorytu, jego skład mineralny i mikrostruktura nie były dotychczas analizowane.

Metody badań

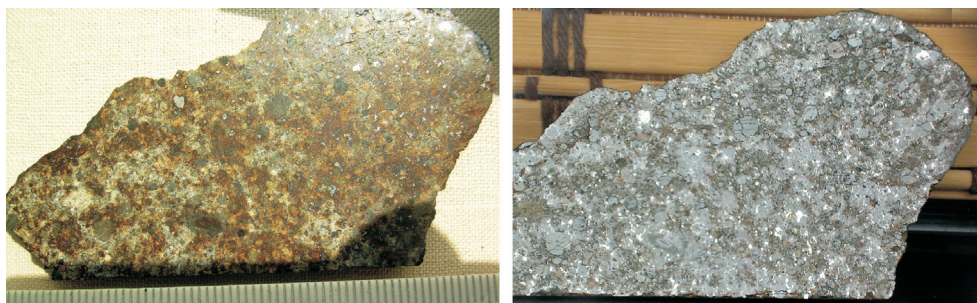
Widma Ramana rejestrowano przy użyciu spektrometru Ramana T-64000 firmy Jobin-Yvon wyposażonego w mikroskop konfokalny BX-40 firmy Olympus. Wzbudzenia dokonywano linią 514,5 nm lasera argonowego firmy LEXEL. Pomiary realizowano wykorzystując obiektyw o powiększeniu 50 \times . Badania prowadzono dla różnej mocy lasera, różnych zakresów i różnych czasów akwizycji. W mikroskopie konfokalnym dzięki przesłonięciu z małym otworem umieszczonej przed detektorem promieniowania sygnali zbierano z małego obszaru przestrzennego, co znacznie ograniczało wielkość tła pochodzącego z obszarów sąsiadujących. Konfokalny mikroskop Ramana dzięki lokalnej detekcji sygnałów i odcięciu silnego tła umożliwił uzyskanie zdolności rozdzielczej rzędu 1 μm . Badane mikroobszary meteorytu zostały wybierane losowo z różnych miejsc.

Analizę widm przeprowadzono przy użyciu programów: PeakFit 4.12 oraz CrystalSleuth. Przy użyciu programu CrystalSleuth usuwano tło fluorescencyjne oraz, na podstawie widm wzorcowych zawartych w bazie programu, identyfikowano minerały wzbudzane w danym mikroobszarze meteorytu światłem lasera. Przy użyciu programu PeakFit numerycznie dopasowywano funkcję Lorentza do danych pomiarowych. Pozwalało to na dokładne określenie położenia pików rama-

nowskich i szerokości połówkowej pików. Dokładność określenia zawartości forsterytu oraz fajalitu w oliwinie została wyznaczona przez nas jako 5% molowych, a zawartość enstatytu w piroksenach jako 7% molowych.

Wyniki

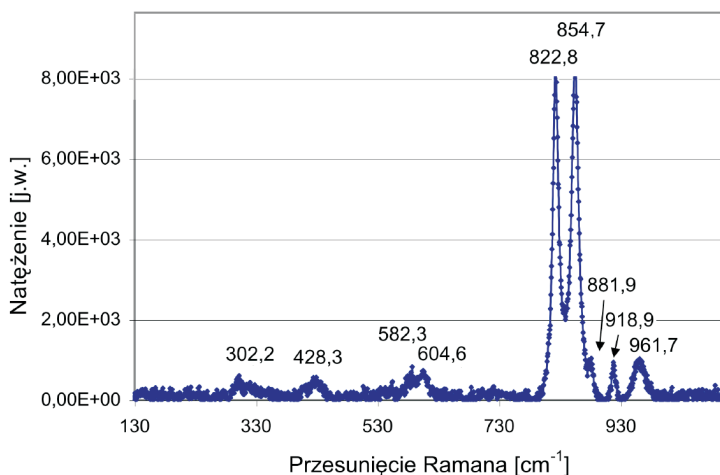
Rysunki 1a i 1b prezentują okaz badanego meteorytu NWA 4505. Ujawniają one obecność chondr i ciasta skalnego. Jasnozielone, zielone, szarozielone i ciemnozielone minerały to ortopiroksen, a prawie czarne i zielonoczarne minerały to ilmenit, geikielit, chromit lub augit. Minerale brązowawe, miodowe i rdzawe reprezentują oliwin. Chondry są w większości wyraźne, a ciasto skalne jest utworzone z tych samych minerałów co chondry. Zdjęcia te pokazują, że w składzie mineralnym meteorytu dominują oliwiny i ortopirokseny. Fazy metaliczne: kamacyt i troilit widoczne jako jasne plamki stanowią około 2% minerałów tworzących chondryt. Kolory minerałów i wielkość chondr wskazują, że meteoryt ten jest podobny do chondrytów typu L.



Rys. 1. Chondryt zwyczajny NWA 4505. (a) Widok ogólny meteorytu. (b) Obraz przy skośnym oświetleniu ujawniający fazy metaliczne: kamacyt i troilit. Obrazy pokazują chondry i ciasto skalne. Jasnozielone, zielone, szarozielone i ciemnozielone minerały to ortopiroksen, a prawie czarne minerały to prawdopodobnie augit, ilmenit, geikielit lub chromit. Minerale brązowawe, miodowe i rdzawe to oliwin. Fazy metaliczne: kamacyt i troilit widać jako jasne plamki. Wymiary płytki meteorytu NWA 4505: 70×38×4 mm.

Minerały mają swoje charakterystyczne piki ramanowskie umożliwiające ich identyfikację. Cechą charakterystyczną widm oliwinów jest występowanie dubletu 820 i 850 cm^{-1} , widm ortopiroksenów dubletu 660 i 680 cm^{-1} , a widm plagioklazu linii 482 i 509 cm^{-1} . W widmie grafitu występują pasma 1350 cm^{-1} (pasmo D) i pasmo 1580-1600 cm^{-1} (pasmo G), w widmie diamentu linia 1332 cm^{-1} , w widmie whitlockitu linie 961 i 975 cm^{-1} , w widmie cristobalitu linia 417 cm^{-1} , w widmie coesyty linia 521 cm^{-1} , w widmie chromitu linia 683 cm^{-1} , w widmie ilmenitu linia 723 cm^{-1} , a w widmie geikielitu linia 716 cm^{-1} (Gillet 2002).

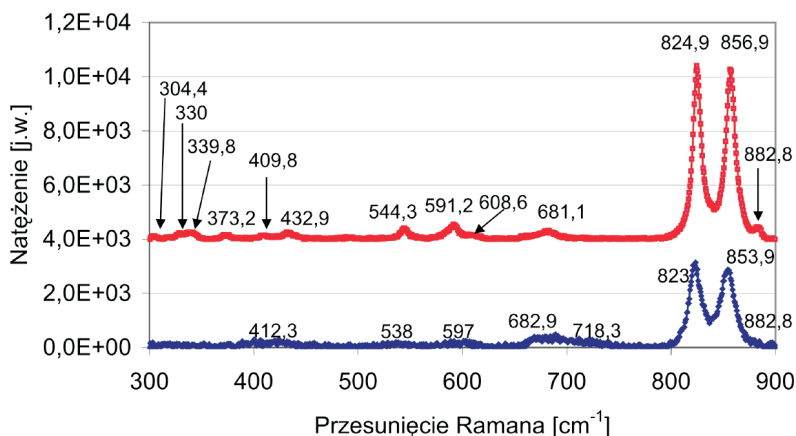
Przykładowe widma ramanowskie z różnych części tego chondrytu pokazano na rysunkach od 2 do 10. Widma z mikroobszarów oliwinowych pokazano na rysunkach 2 i 3, z mikroobszaru oliwinowo-piroksenowo chondrytu pokazano na



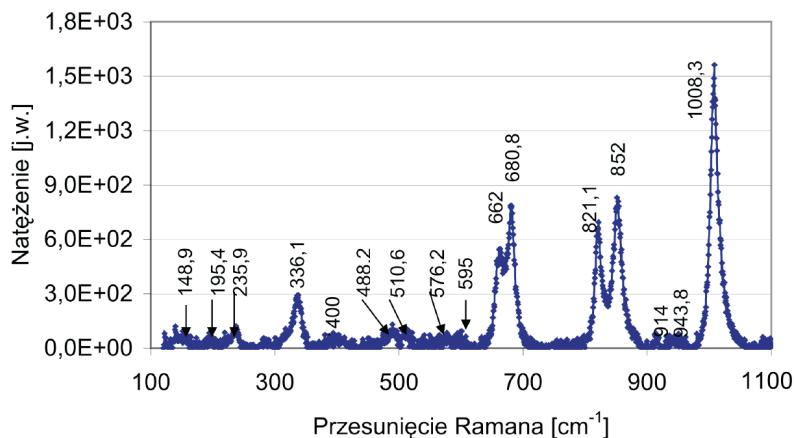
Rys. 2. Widmo Ramana ujawniające oliwin. Linie DB1 i DB2: $822,8 \text{ cm}^{-1}$, $854,7 \text{ cm}^{-1}$ ujawniają skład $\text{Fa}_{11}\text{Fo}_{89}$.

rysunku 4, z mikroobszarów piroksenowych na rysunkach 5, 6 i 7, z obszaru piroksenowo-plagioklazowego na rysunku 6 (dolne widmo), widma uzyskane z obszarów meteorytu zawierających głównie grafit zamieszczono na rysunkach 8 i 9, a widmo meteorytu z obszaru zawierającego głównie whitlockit na rysunku 10. Podane nazwy mikroobszarów pochodzą od zidentyfikowanych w nich minerałów wykazujących najsilniejsze sygnały ramanowskie, a nie od wcześniej zidentyfikowanych elementów struktury meteorytu.

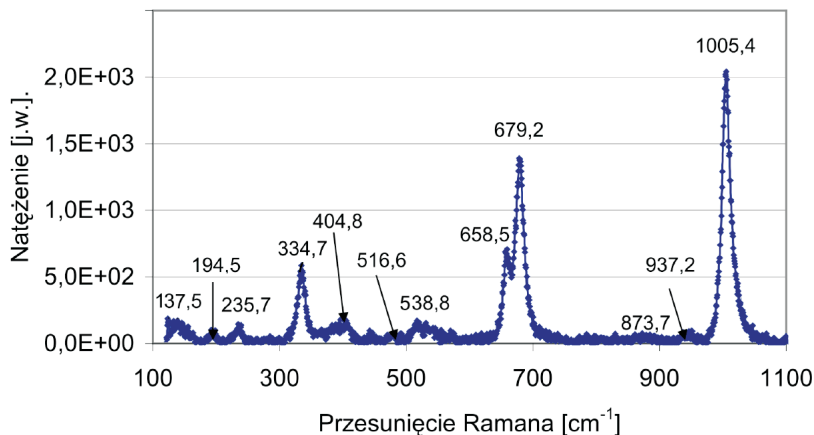
Prezentowane widma ujawniają obecność: oliwinów $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ (rys. 2, 3, 4, 9, 10), ortopiroksenów $(\text{Fe,Mg})_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$ (rys. 4, 5, 6, 7), merylitu (whitlockitu) $\text{Ca}_9\text{MgH}(\text{PO}_4)_7$ (rys. 10) i grafitu C (rys. 8, 9). Skalenie w meteorycie NWA 4505 są reprezentowane przez anortoklaz $(\text{Na}_{-0,6}\text{K}_{-0,4}\text{AlSi}_3\text{O}_8)$, a także przez wysoko-



Rys. 3. Widma Ramana ujawniające oliwin. Widmo górne: linie DB1 i DB2: $824,9 \{8\} \text{ cm}^{-1}$, $856,9 \{10\} \text{ cm}^{-1}$ ujawniają skład $\text{Fa}_0\text{Fo}_{100}$; widmo dolne: $823,0 \{14\} \text{ cm}^{-1}$, $853,9 \{18\} \text{ cm}^{-1}$, $\text{Fa}_6\text{Fo}_{94}$. W nawiasach klamrowych podano szerokość połówkową pików {FWHM}.



Rys. 4. Widmo Ramana ujawniające oliwin i ortopiroksen. Oliwin: linie DB1 i DB2: 821,1 {14}cm⁻¹, 852 {13}cm⁻¹, Fe₂₀Fe₈₀. Opx: linie 336,1 {14}cm⁻¹, 662 {14}cm⁻¹, 680,8 {13}cm⁻¹, oraz 1008,3 {14}cm⁻¹, En₉₀FS₁₀ (En₇₇FS₂₃). W nawiasach klamrowych podano szerokość półwłokową piku {FWHM}.

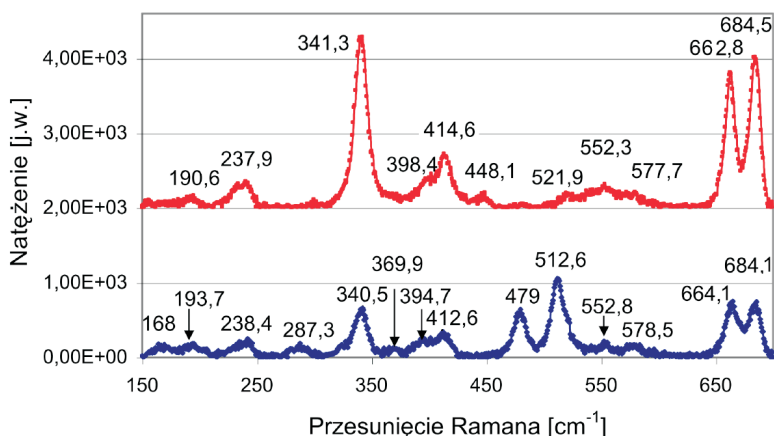


Rys. 5. Widmo Ramana ujawniające ortopiroksen. Linie: 334,7 {13}cm⁻¹, 658,5 {11}cm⁻¹, 679,2 {16}cm⁻¹ oraz 1005,4 {15}cm⁻¹ ujawniają skład piroksenu En₈₀FS₂₀ (En₇₄FS₂₆). W nawiasach klamrowych podano szerokość półwłokową piku {FWHM}.

temperaturowy plagioklaz, stanowiący mieszaninę albitu NaAlSi₃O₈ i anortytu CaAl₂Si₂O₈ (rys. 6).

Widma ramanowskie wskazują także na możliwą obecność diamentu C (rys. 9), obecność dwóch faz krzemionki SiO₂: cristobalitu i coesytu (rys. 6, 7), a także obecność ilmenitu FeTiO₃ (rys. 10), geikielitu MgTiO₃ (rys. 10) oraz chromitu FeCr₂O₄ (rys. 10), jednak do ich potwierdzenia i charakteryzacji wymagane są dodatkowe pomiary, które ujawniłyby dużo silniejsze, charakterystyczne dla tych minerałów piki ramanowskie.

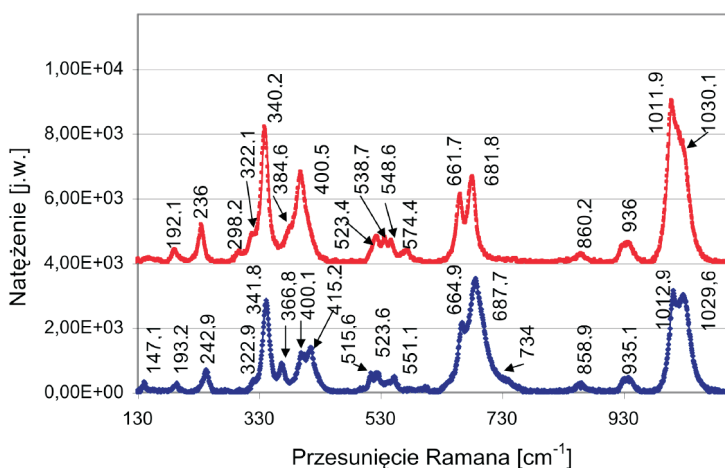
Klinopiroksen augit (Fe,Mg,Ca)₂[Si₂O₆] nie został dotychczas zidentyfikowany w naszych pomiarach ramanowskich, być może z powodu jego niskiej zawartości. Kamacyt (Fe-Ni) występujący w NWA 4505 (rys. 1) nie może być wykryty za



Rys. 6. Widma Ramana ujawniające ortopiroksen, anortoklaz, cristobalit i coesyt. Opx widmo górne: linie: 341,3 cm^{-1} , 662,8 cm^{-1} oraz 684,5 cm^{-1} ujawniają skład piroksenu $\text{En}_{90}\text{Fs}_{10}$ ($\text{En}_{87}\text{Fs}_{13}$). Opx widmo dolne: linie: 340,5 cm^{-1} , 664,1 cm^{-1} oraz 684,1 cm^{-1} ujawniają skład piroksenu $\text{En}_{83}\text{Fs}_{17}$. Cristobalit (SiO_2): linia 415 cm^{-1} , coesyt (SiO_2): linia 521 cm^{-1} . Anortoklaz ($\text{Ab}_{60}\text{Or}_{40}$): linie 168 cm^{-1} , 193,7 cm^{-1} , 479 cm^{-1} oraz 512,6 cm^{-1} .

pomocą spektroskopii Ramana, zaś troilit FeS także obecny w NWA 4505 (rys. 1) jest trudny do identyfikacji tą techniką analityczną. Do weryfikacji tożsamości i analizy składu chemicznego kamacytu, troilitu i augitu zostanie zastosowana analityczna mikroskopia elektronowa.

Mikrospektroskopia Ramana pokazuje, że zidentyfikowane w NWA 4505 minerały są podstawowymi oraz akcesoryjnymi składnikami chondrytów (Hutchison 2004; Norton 2002; Nagy 1975; Hurnik i Hurnik 2005; Manecki 2004; Manecki 2010). Spektroskopia Ramana nie daje możliwości identyfikacji faz metalicznych (kamacytu, taenitu, tetrataenitu), ale umożliwia analizę większości mine-



Rys. 7. Widmo Ramana ujawniające ortopiroksen oraz coesyt. Opx widmo górne: linie 340,2 cm^{-1} , 661,7 cm^{-1} oraz 681,8 cm^{-1} ujawniają skład piroksenu ($\text{En}_{83}\text{Fs}_{17}$). Opx widmo dolne: linie 341,8 cm^{-1} , 664,9 cm^{-1} oraz 687,7 cm^{-1} ujawniają skład piroksenu $\text{En}_{97}\text{Fs}_3$ ($\text{En}_{94}\text{Fs}_6$). Coesyt: linia 523 cm^{-1} .

rałów niemetalicznych, krzemianów, glinokrzemianów, skaleni, faz węglowych, faz krzemionki i innych. Obecność cristobalitu (rys. 6), który jest wysokotemperaturową fazą krzemionki dowodzi epizodu wysokotemperaturowego tego meteorytu, a obecność coesyту (rys. 6, 7), będącego wysokociśnieniową fazą krzemionki dowodzi epizodu wysokociśnieniowego.

Widma Ramana minerałów badanych meteorytów przez porównanie z widmami wzorcowymi minerałów zamieszczonymi w bazach danych oraz publikacjach umożliwiły nam oprócz zidentyfikowania, także określenie składu niektórych minerałów. Położenia pików ramanowskich dubletu oliwinu 820 (linia DB1) i 850 (linia DB2) cm^{-1} umożliwiło określenie składu Fo-Fa w oliwinie (rys. 2, 3, tab. 1).

Określenie składu oliwinów i piroksenów oparto o skalowanie podane w literaturze (Huang et al. 2000; Kuebler et al. 2006; Wang et al. 2001). Położenia pików skalenia 168 cm^{-1} , 193,7 cm^{-1} , 479 cm^{-1} oraz 512,6 cm^{-1} (rys. 6, widmo dolne) dały możliwość jego rozróżnienia spośród innych skaleni, jako anortoklaz (przybliżony skład $\text{Ab}_{60}\text{Or}_{40}$) i jako wysokotemperaturowego plagioklaz (Freeman et al. 2003). Jednak dokładny skład plagioklaz $\text{An}_x\text{Ab}_{1-x}$, t.j. zawartość molową x w nim anortytu An i zawartość albitu z danych Ramana nie można określić, gdyż dotychczas brak danych kalibracyjnych.

Tabela 1. Położenie dwu charakterystycznych pików ramanowskich DB1 i DB2 kryształów oliwinów i zawartość molowa forsterytu (Fo) oraz fajalitu (Fa) w oliwinie meteorytu NWA 4505.

DB1 (cm^{-1})	DB2 (cm^{-1})	Skład oliwinu (% mol)				ΔFo	ΔFo^*	$\Delta\text{Fo}^\#$
		DB1-DB2	DB1	DB2	Średnia			
821	852,4	$\text{Fo}_{78}\text{Fa}_{22}$	$\text{Fo}_{84}\text{Fa}_{16}$	$\text{Fo}_{81}\text{Fa}_{19}$	$\text{Fo}_{81}\text{Fa}_{19}$	-6	-3	-3
821,1	852,0	$\text{Fo}_{80}\text{Fa}_{20}$	$\text{Fo}_{84}\text{Fa}_{16}$	$\text{Fo}_{79}\text{Fa}_{21}$	$\text{Fo}_{79}\text{Fa}_{21}$	-4	+1	+1
822,1	854,5	$\text{Fo}_{83}\text{Fa}_{17}$	$\text{Fo}_{92}\text{Fa}_8$	$\text{Fo}_{91}\text{Fa}_9$	$\text{Fo}_{89}\text{Fa}_{11}$	-9	-8	-6
822,8	854,7	$\text{Fo}_{89}\text{Fa}_{11}$	$\text{Fo}_{96}\text{Fa}_4$	$\text{Fo}_{92}\text{Fa}_8$	$\text{Fo}_{92}\text{Fa}_8$	-7	-3	-3
823,0	853,9	$\text{Fo}_{94}\text{Fa}_6$	$\text{Fo}_{96}\text{Fa}_4$	$\text{Fo}_{88}\text{Fa}_{12}$	$\text{Fo}_{93}\text{Fa}_7$	-2	+6	+1
824,9	856,9	$\text{Fo}_{100}\text{Fa}_0$	$\text{Fo}_{100}\text{Fa}_0$	$\text{Fo}_{100}\text{Fa}_0$	$\text{Fo}_{100}\text{Fa}_0$	0	0	0
{8-14}	{10-18}	[Fa_{0-22}]	[Fa_{0-16}]	[Fa_{0-21}]	[Fa_{0-21}]	[-9,0]	[-8, +1]	[-3, +1]
						[[-5±3]]	[[-1±5]]	[[-2±3]]

DB1 oznacza pik należący do pasma 820 cm^{-1} , DB2 pik należący do pasma 850 cm^{-1} .

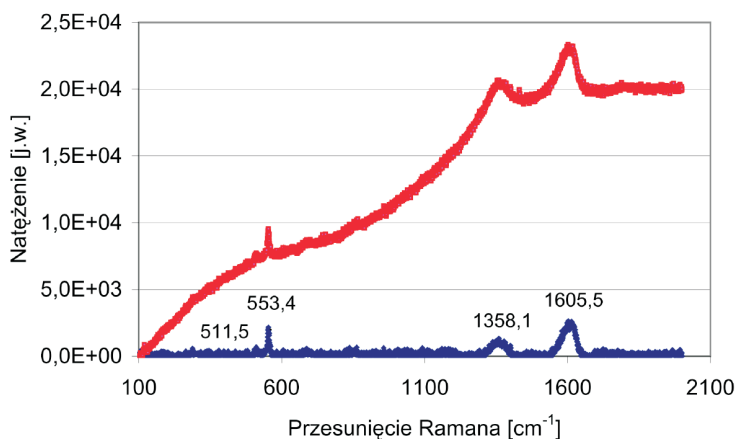
DB1-DB2 zawartość Fo określona w oparciu o krzywą kalibracji dla obu pików DB1 i DB2.

DB1 zawartość Fo określona w oparciu o krzywą kalibracji dla pików DB1.

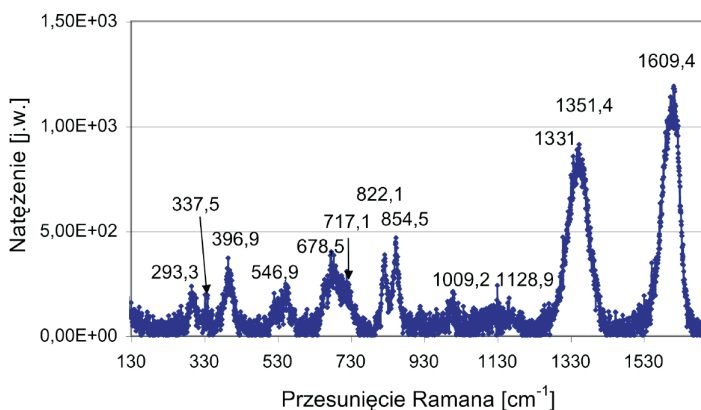
$\Delta\text{Fo} = \text{Fo}(\text{DB1-DB2}) - \text{Fo}(\text{DB1})$ różnica pomiędzy zawartością Fo określoną ze skalowania z wykorzystaniem obu pików ramanowskich DB1 i DB2 i zawartością Fo określoną z krzywej skalowania tylko dla jednego pików DB1 (% mol).

$\Delta\text{Fo}^* = \text{Fo}(\text{DB1-DB2}) - \text{Fo}(\text{DB2})$ różnica pomiędzy zawartością Fo określoną ze skalowania z wykorzystaniem obu pików ramanowskich DB1 i DB2 i zawartością Fo określoną z krzywej skalowania tylko dla jednego pików DB2 (% mol).

$\Delta\text{Fo}^\# = \text{Fo}(\text{DB1-DB2}) - \text{Fo}(\text{Średnia})$ różnica pomiędzy zawartością Fo określoną ze skalowania z wykorzystaniem obu pików ramanowskich DB1 i DB2 i zawartością Fo określoną ze średniej. [] Zakres zawartości Fa i Fo oraz ΔFo , ΔFo^* i $\Delta\text{Fo}^\#$. [] Wartość średnia. { } Zakres wartości szerokości połowkowej FWHM pików DB1 i DB2 oliwinu.



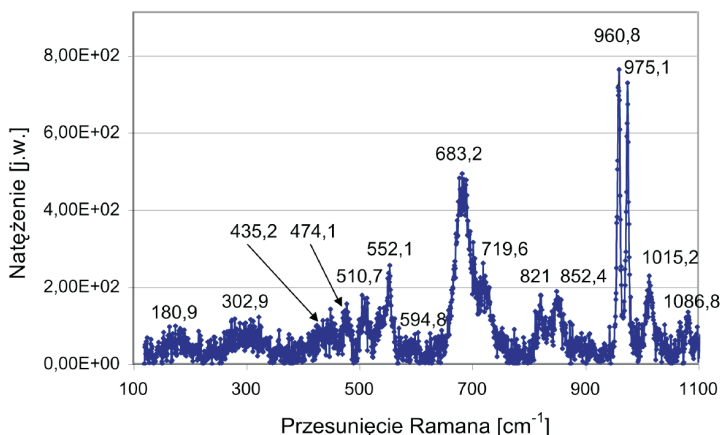
Rys. 8. Widmo Ramana ujawniające grafit (linia D grafitu 1358 cm^{-1} , linia G 1605 cm^{-1}). Widmo górne to widmo Ramana z tłem fluorescencyjnym, widmo dolne reprezentuje dane pomiarowe po odcięciu tła. Stosunek (ID/IG) wysokości pików D i G oraz szerokość połowkowa linii {FWHM}: ID/IG = 0.5, FWHM-D = 58 cm^{-1} . FWHM-G = 50 cm^{-1} .



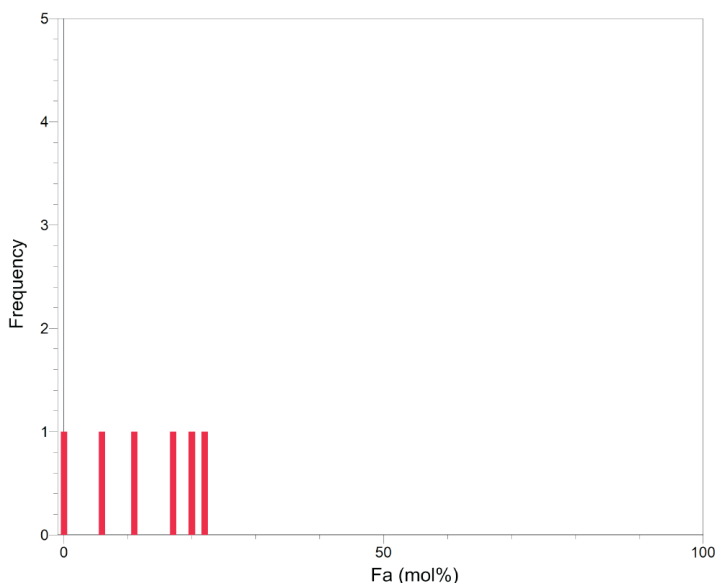
Rys. 9. Widmo Ramana ujawniające grafit (linia D 1351 cm^{-1} , linia G $1609,4\text{ cm}^{-1}$), oliwin ($822,1\text{ cm}^{-1}$, $854,5\text{ cm}^{-1}$, diament (1331 cm^{-1}). Grafit: stosunek (ID/IG) wysokości pików D i G oraz szerokość połowkowa {FWHM} linii: ID/IG = 0.76, FWHM-D = 71 cm^{-1} , FWHM-G = 45 cm^{-1} . Oliwin: linie $822,1\text{ cm}^{-1}$ i $854,5\text{ cm}^{-1}$ ujawniają skład $\text{Fo}_{83}\text{Fa}_{17}$.

Badania meteorytu NWA 4505 za pomocą mikroskopii optycznej pokazują, że oliwiny są obecne w chondrach oraz w cieście skalnym meteorytu NWA 4505 i są jednym z dwóch (OL i Opx) dominujących minerałów tego chondrytu (rys. 1a, b). Niżej prezentowana analiza widm ramanowskich otrzymanych z różnych mikroobszarów meteorytu pokazuje względnie szeroki zakres zawartości forsterytu (Fo) w oliwinie, mieszczący się w przedziale od 78 do 100% mol (tab. 1, kolumna 3, rys. 11). Skład oliwinu określony z dwu pierwszych widm Ramana pokazanych na rysunkach 2 i 3 jest bliski czystemu forsterytowi ($\text{Fo}_{89-94}\text{Fa}_{6-11}$) lub jest czystym forsterytem (Fo_{100}). Prawdopodobnie widma te prezentują oliwin o barwie jaśniejszej (żółtawej i miodowej). Oliwin ciemniejszy (brązowawy) zwykle czę-

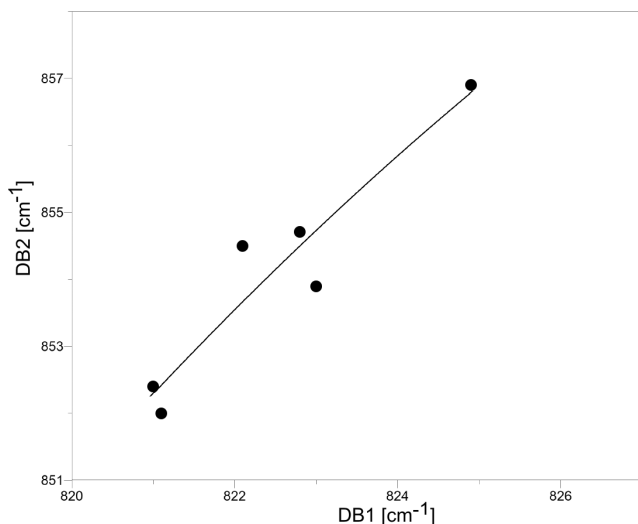
ściej buduje chondry, co oznacza wyższą zawartość fajalitu (Fa) w oliwinie tych chondr. Wyniki badań minerałów i mikrostruktury meteorytu NWA 4505 przeprowadzonych na płycie grubej (rys. 1) tego chondrytu za pomocą mikroskopii optycznej zostaną zaprezentowane w oddzielnej pracy (Szurgot 2013). Pokazują one, że znaczna część chondr w tym meteorycie zawiera oliwin z wyższą zawartością fajalitu Fa_{17-22} , a mniejszą zawartością forsterytu For_{78-83} .



Rys. 10. Widmo Ramana ujawniające whitlockit (merylit) (piki 960,8 oraz 975,1 cm^{-1}), oliwin (linie 821 i 852,4 cm^{-1} , $For_{78}Fa_{22}$), ilmenit (linia 683,3 cm^{-1}), chromit i/lub geikielit (719,6 cm^{-1}).



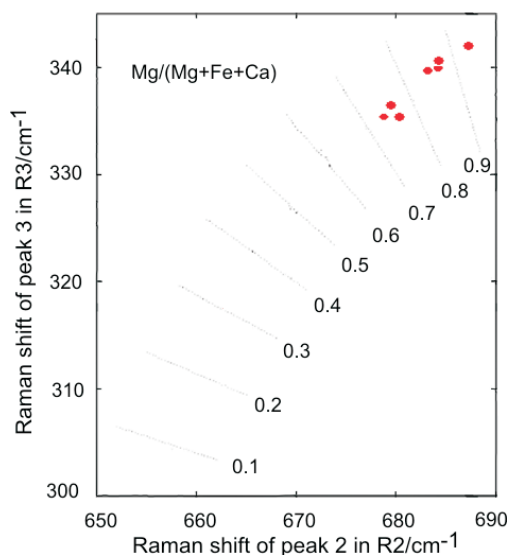
Rys. 11. Histogram zawartości fajalitu w oliwinie meteorytu NWA 4505. Rozkład ujawnia obecność dwóch grup oliwinów, jednej z dużą zawartością forsterytu i niższą fajalitu $For_{89-100}Fa_{0-11}$ oraz drugiej z wyższą zawartością fajalitu $For_{78-83}Fa_{17-22}$. Zawartość Fa określona dzięki wykorzystaniu skalowania dla obu pików DB1 i DB2 (tab. 1).



Rys. 12. Współzależność pików dubletu oliwinu DB1 i DB2 w meteorycie NWA 4505.

W tabeli 1 zestawiono położenia pików charakterystycznych kryształów oliwinu obecnych w meteorycie NWA 4505 oraz zawartość molową forsterytu (Fo) i fajalitu (Fa) w oliwinie tego meteorytu określoną z krzywych kalibracyjnych oliwinu (Kuebler et al. 2006). Według prezentowanych tu danych ramanowskich zawartość fajalitu w oliwinie mieści się w zakresie 0–22% molowych.

Rysunek 11 ujawnia histogram rozkładu fajalitu (Fa) w oliwinie meteorytu NWA 4505, a rysunek 12 prezentuje współzależność charakterystycznych pików DB1 i DB2 dubletu oliwinu w meteorycie NWA 4505. Dane te potwierdzają, że w meteorycie NWA 4505 rozróżnić można dwie grupy oliwinów, jedną o wysokiej



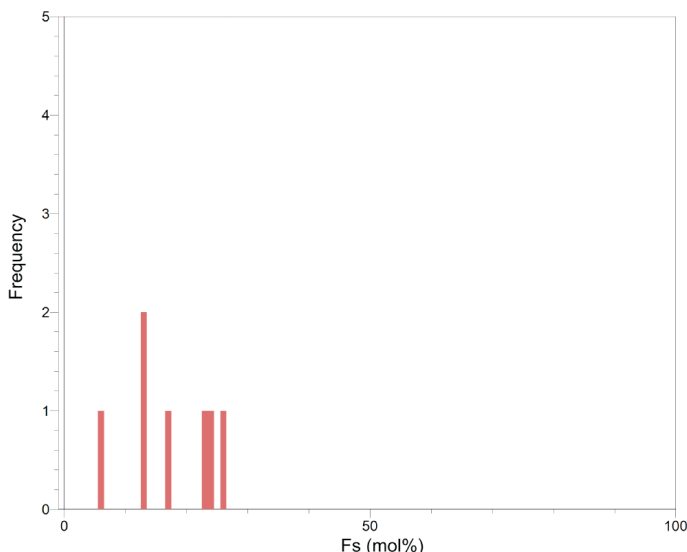
Rys. 13. Zawartość enstatytu (En) w piroksenie meteorytu NWA 45405. Zawartość En (% molowe En = Mg/Mg+Fe+Ca) została określona w oparciu o skalowanie Wanga et al. z wykorzystaniem położenia pików należących do pasm 340 cm⁻¹ i 680 cm⁻¹ (Wang et al. 2001) (patrz tab. 2).

zawartości forsterytu ($\text{Fo}_{89-100}\text{Fa}_{0-11}$) oraz drugą zawierającą niższą zawartość forsterytu i wyższą zawartość fajalitu (Fa_{17-22}).

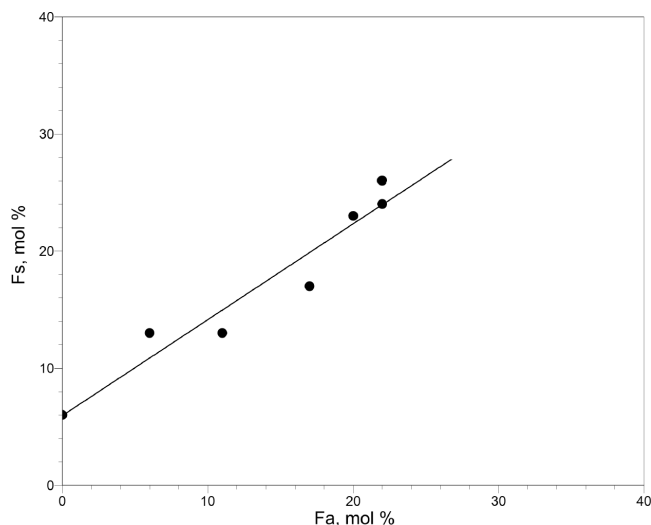
Ponieważ nasze widma ramanowskie były otrzymywane z mikroobszarów wybieranych losowo, nie zostały one skorelowane z elementami struktury tego chondrytu. Obecnie nie możemy rozdzielić składu mineralnego chondr od składu minerałów skały macierzystej. Badania przy pomocy analitycznej mikroskopii elektronicznej umożliwią określenie składu oliwinu w znanych miejscach struktury meteorytu NWA 4505 (Szurgot i Polański 2013). Zestawienie składu oliwinu uzyskanego spektroskopią Ramana i ustalonego dla chondrytów zwyczajnych klasy L zamieszczono w dalszej części pracy (tab. 5).

Uzyskane przez nas wyniki pozwalają oszacować dokładność pomiarów składu oliwinu za pomocą mikrospektroskopii Ramana. Tabela 1 ujawnia różnice pomiędzy zawartością forsterytu w oliwinie określoną dzięki wykorzystaniu dwóch krzywych kalibracji opublikowanych przez Kuebler i współpracowników, jednej z użyciem obu pików ramanowskich DB1 i DB2 i dwóch innych wyskalowanych dla jednego pików DB1 lub DB2 (Kuebler et al. 2006). W ostatnich trzech kolumnach tabeli 1 zaprezentowano te różnice (ΔFo , ΔFo^* , $\Delta\text{Fo}^\#$). Dane te świadczą o tym, że przy założeniu bezbłędnych krzywych kalibracyjnych, dokładność określenia zawartości forsterytu i fajalitu w oliwinie meteorytu NWA 4505 może być przyjęta jako 5% molowych, a najdokładniejsze pomiary składu oliwinu za pomocą spektroskopii Ramana uzyskuje się wykorzystując oba pików DB1 i DB2.

Położenia wybranych linii ortopiroksenów (linii 340 cm^{-1} oraz 680 cm^{-1}) umożliwiły określenie przybliżonego składu ortopiroksenu. Zawartość enstatytu (En) w ortopiroksenie meteorytu NWA 4505 pokazano na rysunku 13. Zawartość ferrosilitu (Fs) w ortopiroksenie w tym skalowaniu jest określona przez uzupełnienie



Rys. 14. Histogram zawartości ferrosilitu (Fs) w piroksenie. Zawartość Fs została określona z wykorzystaniem skalowania Wanga et al. (Wang et al. 2001) (tab. 2).



Rys. 15. Związek między zawartością ferrosylitu (Fs) w piroksenie i fajalitu (Fa) w oliwinie.

składu do 100% molowych. Zgodnie z danymi kalibracyjnymi Wang'a i współpracowników (Wang et al. 2001) ortopiroksen w NWA 4505 ma skład: $En_{74-94}Fs_{6-26}$ (rys. 4–7, 13, tab. 2), natomiast wyniki Huang'a i współpracowników (Huang et al. 2000) wskazują na skład: $En_{80-97}Fs_{3-20}$ (tab. 2, rys. 4–7, 14). Dane te pokazują, że w NWA 4505 występują dwie grupy ortopiroksenów: jedna z wysoką zawartością enstatytu, dochodzącą do 100% molowych (En_{94-97}) i druga o mniejszej zawartości enstatytu ($En_{74-87}Fs_{13-26}$) (rys. 7, 13, 14 i tab. 2).

Tabela 2 pokazuje, że w przypadku ortopiroksenów ich dwa skalowania ramanowskie prowadzą do większych różnic w składzie piroksenu niż różnice w składzie

Tabela 2. Położenie wybranych pików ramanowskich ortopiroksenu i zawartość molowa enstatytu (En) oraz ferrosylitu (Fs) w piroksenie meteorytu NWA 4505.

A (cm^{-1})	B (cm^{-1})	C (cm^{-1})	D (cm^{-1})	E (cm^{-1})	Skład piroksenu (% mol)	
					wg Wang'a et al.*	wg. Huang'a et al. #
334,7	658,5	679,2	1005,4		$En_{74}Fs_{26}$	$En_{80}Fs_{20}$
336,1	662	680,8	1008,3		$En_{77}Fs_{23}$	$En_{90}Fs_{10}$
341,3	662,8	684,5	ND		$En_{87}Fs_{13}$	$En_{90}Fs_{10}$
340,5	664,1	684,1	ND		$En_{87}Fs_{13}$	
340,2	661,7	681,8	1011,9	1030,1	$En_{83}Fs_{17}$	
341,8	664,9	687,7	1012,9	1029,6	$En_{94}Fs_6$	$En_{97}Fs_3$
337,5		678,5	1009,2		$En_{76}Fs_{24}$	
{13-14}	{11-14}	{13-16}	{14-15}		$[En_{74-94}Fs_{6-26}]$	$[En_{80-97}Fs_{3-20}]$

* Zawartość En wg skalowania Wang'a et al. (Wang et al. 2001). Zawartość Fs jest uzupełnieniem składu do 100% mol. # Zawartość En i Fs wg skalowania Huang'a et al. (Huang et al. 2000). [] Zakres zawartości En i Fs. { } Zakres wartości szerokości połowkowej FWHM pików. ND – brak danych.

oliwinu. Uwzględniając nasze obecne i wcześniejsze dane dokładność określenia zawartości En i Fs w piroksenie szacujemy na 7% molowych.

Uzszeregowanie zawartości ferrosilitu w piroksenie i zawartości fajalitu w oliwinie ujawnia związek między zawartością Fs i zawartością Fa w meteorycie NWA 4505 (rys. 15). Tutaj również wydzielić można dwie grupy, jedną o mniejszej zawartości żelaza (Fa_{0-11} , Fs_{6-13}) i drugą o większej zawartości żelaza (Fa_{17-22} , Fs_{17-26}) w obu krzemianach meteorytu NWA 4505.

Analiza szerokości połówkowych pików ramanowskich (ang. FWHM) oliwinu i piroksenu z meteorytu NWA 4505 pokazuje, że piki DB1 i DB2 oliwinu mają szerokość połówkową rzędu $8-18\text{ cm}^{-1}$ (tab. 1, 3), a piki ortopiroksenu szerokość rzędu $11-16\text{ cm}^{-1}$ (tab. 2, 4). Dane te wskazują na dobre uporządkowanie strukturalne kryształów oliwinu i piroksenu, ponieważ wskaźnikiem doskonałości struktury wewnętrznej są wąskie i dobrze zdefiniowane linie ramanowskie.

Porównaliśmy szerokości połówkowe FWHM-DB1 i FWHM-DB2 obu charakterystycznych linii dubletu oliwinu 820 cm^{-1} i 850 cm^{-1} zmierzone przez nas na tej samej aparaturze w pięciu grupach oliwinu: w oliwinie pallasytu Brahin, w monokryształe oliwinu z Pakistanu, w oliwinie meteorytu NWA 4505, w oliwinie z ziemskiego bazaltu nefelinowego i z ziemskiego oliwinu z bomby oliwinowej (tab. 3). Najmniejsze szerokości połówkowe wykazał monokryształ oliwinu ziemskiego (FWHM-DB1 = $9-10\text{ cm}^{-1}$, FWHM-DB2 = $8-10\text{ cm}^{-1}$) i oliwin z ziemskiego bazaltu nefelinowego (FWHM-DB1 = $8-9\text{ cm}^{-1}$, FWHM-DB2 = $10-11\text{ cm}^{-1}$), trochę szersze linie wykazał oliwin pallasytu Brahin (FWHM-DB1 = $9-10\text{ cm}^{-1}$, FWHM-DB2 = $10-12\text{ cm}^{-1}$). Wyniki badania oliwinu w chondrycie NWA 4505 potwierdziły dobre uporządkowanie jego struktury krystalicznej (FWHM-DB1 = $8-14\text{ cm}^{-1}$, FWHM-DB2 = $10-18\text{ cm}^{-1}$), porównywalne do oliwinu z ziemskiej bomby oliwinowej (FWHM-DB1 = $8-16\text{ cm}^{-1}$, FWHM-DB2 = $9-18\text{ cm}^{-1}$), jest ono jednak gorsze niż oliwinu z pallasytu i wyraźnie gorsze niż monokrystalicznego oliwinu ziemskiego i oliwinu z bazaltu nefelinowego. Dane nasze wskazują, że zarówno FWHM-DB1 jak i FWHM-DB2 są wiarygodnym miernikiem uporządkowania sieci krystalicznej oliwinu. Zaobserwować można, że szerokość połówkowa piku DB2 ulega większym zmianom niż szerokość połówkowa piku DB1, jest więc bardziej czułym wskaźnikiem doskonałości strukturalnej.

Analiza faz węgla meteorytu NWA 4505 potwierdza występowanie grafitu i prawdopodobnie także diamentu (rys. 7, 8). Określono stosunki wysokości pików D i G dla grafitu (ID/IG) oraz szerokość połówkową pików D i G (FWHM-D,

Tabela 3. Szerokość połówkowa linii ramanowskich dubletu DB1 i DB2 oliwinu z meteorytu NWA 4505, oliwinu z pallasytu Brahin oraz monokryształu oliwinu ziemskiego.

	Oliwin z Pakistanu	Oliwin z pallasytu Brahin	Oliwin z chondrytu NWA 4505	Oliwin z bazaltu nefelinowego	Oliwin z bomby oliwinowej z Czech
FWHM-DB1 (cm^{-1})	9–10	9–10	8–14	8–9	8–16
FWHM-DB2 (cm^{-1})	8–10	10–12	10–18	10–11	9–18

Tabela 4. Szerokość połówkowa wybranych linii ramanowskich ortopiroksenu z meteorytu NWA 4505.

Pasmo	Opx z chondrytu NWA 4505
340 cm ⁻¹	13–14
660 cm ⁻¹	11–14
680 cm ⁻¹	13–16
1010 cm ⁻¹	14–15
Zakres FWHM (cm ⁻¹)	11–16

FWHM-G). Stosunek ID/IG mieści się w przedziale wartości 0,5–0,76, szerokość połówkowa FWHM-D w przedziale 58–71 cm⁻¹, a szerokość połówkowa FWHM-G w przedziale 45–50 cm⁻¹. Te wstępne dane wskazują na niezbyt dobrze uporządkowany strukturalnie grafit, o czym świadczy również sama obecność pików D i silne tło fluorescencyjne widma Ramana (rys. 8, widmo górne). Występowanie drugiej fazy węgla, tj. diamentu, powinno być jeszcze zweryfikowane.

Analiza rozmiarów chondr reprezentowanych przez ich średnicę pokazuje, że w meteorycie NWA 4505 najwięcej chondr ma średnice z przedziału 0,6–1 mm. Dane te wskazują na klasę L chondrytu NWA 4505, ponieważ rozmiary chondr w klasie L wynoszą 0,6–0,8 mm (Hutchison 2004; Brearley i Jones 1998). Z drugiej strony nasze wstępne dane dotyczące składu modalnego wskazują, że chondryt NWA 4505 zawiera nieco mniej faz metalicznych niż chondryty zwyczajne klasy L, tj. około 2% objętościowych. W chondrytach L jest nieco mniej niż 5% faz metalicznych, a w chondrytach klasy LL około 2% (Hutchison 2004). To wskazuje bardziej na klasę LL chondrytu NWA 4505 niż na klasę L. Wykorzystanie analitycznej mikroskopii elektronowej pozwoli na dokładniejsze pomiary modalne meteorytu NWA 4505 zarówno przy małych jak i przy dużych powiększeniach. Duże powiększenia pozwolą wykryć i zanalizować także bardzo małe fragmenty minerałów, również faz metalicznych.

Barwa minerałów meteorytu NWA 4505 wskazuje, że jest on podobny do chondrytów L, w szczególności do NWA 869 (L4-6), Sahary 02500 (L3) oraz Gold Basin (L4). Oznacza to, że zawartość fajalitu (Fa) w oliwinach i zawartość ferrosilitu (Fs) w piroksenach chondrytu NWA 4505 powinna być zbliżona do zawartości Fa w oliwinach i zawartości Fs w piroksenach innych chondrytów L. Dane z Meteoritical Bulletin Database informują o zawartości fajalitu we wszystkich ww. chondrytach: NWA 869 (Fa_{24,2}), Sahara 02500 (Fa_{26±2}), Gold Basin (Fa_{23–25}), ale tylko w jednym z tych chondrytów znana jest zawartość ferrosilitu i wollastonitu w piroksenie, tj. w Gold Basin (Fs₂₀Wo₁). Zawartość fajalitu Fa_{23–26} w oliwinach trzech chondrytów L, wybranych do porównania z chondrytem NWA 4505 jest nieco powyżej górnej granicy zawartości fajalitu (Fa₂₂) w oliwinie meteorytu NWA 4505. Są to na tyle bliskie wartości, że skład grupy II oliwinów meteorytu NWA 4505, tej o wyższej zawartości żelaza, można z dużą ostrożnością przyporządkować do oliwinów grupy chondrytów L. Zawartość enstatytu i ferrosi-

litu w ortopiroksenie chondrytu zwyczajnego L4 Gold Basin ($En_{79}Fs_{20}Wo_1$) jest wewnątrz zakresu określonego przez nas dla ortopiroksenu chondrytu NWA 4505: $En_{74-94}Fs_{0-26}$.

W tabeli 5 zestawiono skład oliwinów i piroksenów określony przez nas w meteorycie NWA 4505 przy pomocy mikrospektroskopii Ramana oraz skład tych minerałów w chondrytach zwyczajnych grup H, L i LL. Zestawienie to pokazuje, że grupa oliwinów i grupa ortopiroksenów meteorytu NWA 4505 o większej zawartości żelaza wskazuje NWA 4505 jako chondryt L, chociaż przynależność do chondrytów H nie może być w oparciu o te dane wykluczona. Jednak szeroki przedział zawartości fajalitu w oliwinie i ferrosilitu w piroksenie ustalony za pomocą spektroskopii Ramana, zwłaszcza istnienie grupy I (grupy OL i Opx z niską zawartością Fe) przeczą przyporządkowaniu NWA 4505 do chondrytów L i wskazują raczej na chondryt H, czego z kolei nie można pogodzić ze zbyt niską zawartością faz metalicznych: kamacytu i troilitu wstępnie ustaloną przez nas na około 2%, ponieważ tak niska zawartość faz metalicznych występuje tylko w grupie chondrytów LL. Te rozbieżności czynią ostateczną klasyfikację chondrytu NWA 4505 jako zadanie jeszcze nie zakończone. Analiza składu oliwinów i piroksenów, a także składu chemicznego innych minerałów chondrytu NWA 4505 wymaga zastosowania analitycznej mikroskopii elektronowej.

W tabeli 6 zestawiono minerały występujące w chondrytach zwyczajnych należących do grupy L, skład modalny chondrytów L oraz minerały wykryte w meteorycie NWA 4505 za pomocą mikrospektroskopii Ramana i mikroskopii optycznej. Dane te wskazują, że prawie wszystkie minerały chondrytów grupy L, wymienione w monografii Dodda (Dodd 1981), z wyjątkiem apatytu, zostały przez nas zidentyfikowane w chondrycie NWA 4505. Zamiast apatytu wykryliśmy

Tabela 5. Zawartość fajalitu (Fa) w oliwinie, zawartość ferrosilitu (Fs) w ortopiroksenie, typ skalenia i zawartość albitu (Ab), anortytu (An) oraz ortoklaz (Or) w skaleniu chondrytów zwyczajnych (OC) grup H, L i LL oraz w chondrycie NWA 4505.

OC grupa H	OC Grupa L	OC grupa LL	Chondryt NWA 4505 zakres	Chondryt NWA 4505 I Grupa	Chondryt NWA 4505 II Grupa
Fa ₁₆₋₂₀ * Fs ₁₄₋₂₀	Fa ₂₁₋₂₅ * Fs ₂₀₋₃₀	Fa ₂₆₋₃₂ * Fs ₃₂₋₄₀	Fa ₀₋₂₂ Fs ₆₋₂₆	Fa ₀₋₁₁ Fs ₆₋₁₃	Fa ₁₇₋₂₂ Fs ₁₇₋₂₆
Fa ₁₆₋₂₀ ** Fs ₁₅₋₁₈	Fa ₂₂₋₂₆ ** Fs ₁₉₋₂₂	Fa ₂₇₋₃₂ ** Fs ₂₂₋₂₆			
Fa = 15*** Fs = 14	Fa ₂₂₋₃₂ **** Fs ₂₀₋₃₀				
An ₂₁ Ab ₇₃ Or ₆ #	An ₁₈ Ab ₇₆ Or ₆ #				Anortoklaz Ab ₆₀ Or ₄₀
An ₁₂ Ab ₈₂ Or ₆ #	An ₁₀ Ab ₈₄ Or ₆ #	An ₁₀ Ab ₈₆ #			Plagiokl. An _x Ab _{1-x}

* Dane Nortona (Norton 2002). ** Dane Hutchisona (Hutchison 2004).

*** Dane Masona dla chondrytów oliwinowo-bronzytowych (Mason 1962).

**** Dane Masona dla chondrytów oliwinowo-hiperstenowych (Mason 1962). # Dane Masona oraz Dodda dla chondrytów H i L (Dodd 1981; Mason 1962). I grupa oliwinów i piroksenów w NWA 4505 to grupa o niskiej zawartości żelaza, II grupa to grupa o wysokiej zawartości żelaza.

inny fosforan, tj. whitlockit, nazywany także merylitem. Inne dane literaturowe (Mason 1962, Hutchison 2004), także nasze własne dane (Szurgot i Polański 2007; Szurgot et al. 2008; Szurgot i Kozanecki 2009; Szurgot et al. 2009 a, b; Szurgot i Tszedel 2011; Szurgot et al. 2011) potwierdzają, że wszystkie minerały wykryte w NWA 4505 są składnikami chondrytów.

Identyfikacja minerałów chondrytu NWA 4505 pozwala na zestawienie pierwiastków tworzących ten chondryt. W sumie jest to 15 pierwiastków: O, Si, Mg, Fe, Ni, Ca, P, Al, Na, K, S, C, Ti, Cr, C oraz H. Pierwiastki te tworzą następujące minerały występujące w meteorycie NWA4505: oliwin $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$, ortopiroksen $(\text{Fe,Mg})_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$, whitlockit $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ lub $\text{Ca}_9\text{MgH}(\text{PO}_4)_7$, anortoklaz $\text{Na}_{-0.6}\text{K}_{-0.4}\text{AlSi}_3\text{O}_8$, plagioklaz $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ - $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$, augit $(\text{Fe,Mg,Ca})_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$, ilmenit FeTiO_3 , geikielit MgTiO_3 , chromit FeCr_2O_4 , cristobalit SiO_2 , coesyt SiO_2 , kamacyt Fe-Ni, troilit FeS, grafit C i diament C. Dane literaturowe wskazują, że ww. pierwiastki stanowią 99,4% wagowych chondrytów L (Mason 1962).

Tabela 6. Minerale meteorytu NWA 4505 zidentyfikowane w niniejszej pracy za pomocą mikrospektroskopii Ramana i mikroskopii optycznej oraz minerały tworzące chondryty zwyczajne grupy L. Minerale i skład modalny chondrytów L według Dodda (Dodd 1981), a także wg Masona (Mason 1962).

OC Grupa L	% objętościowe	Chondryt NWA 4505 zakres	Chondryt NWA 4505 I Grupa	Chondryt NWA 4505 II Grupa
Oliwin Fa_{21-25}	47,0 (35–60)*	Oliwin Fa_{0-22}	Fa_{0-11}	Fa_{17-22}
Pirokseny Fs_{20-30}	(25–35)	Ortopirokseny Fs_{6-26}		
Hipersten	22,7	Bronzyt, Enstatyt	Enstatyt Fs_{6-13}	Bronzyt Fs_{17-26}
Diopsyd	4,6			
		Augit		
Skaleń	10,7	Skaleń		
$\text{An}_{18}\text{Ab}_{76}\text{Or}_6$		Anortoklaz $\text{Ab}_{60}\text{Or}_{40}$		
(Plagioklaz: Oligoklaz $\text{An}_{10-30}\text{Ab}_{70-90}$, Maskelinin)*	(–10, 5–10)	HT Plagioklaz $\text{An}_x\text{Ab}_{1-x}$		
FeNi	7,5 (–8,1–10)	Kamacyt		
Troilit	6,1 (–5)	Troilit		
Chromit	0,6	Chromit		
Apatyt	0,6			
		Whitlockit		
Ilmenit	0,2	Ilmenit		
		Grafit		
		Diament		
		Cristobalit		
		Coesyt		

* Dane dla chondrytów oliwinowo-hiperstenowych (dawna nazwa chondrytów L) (Mason 1962).

Wnioski

Spektroskopia Ramana pozwala na nieinwazyjne badania minerałów pozaziemskich. Umożliwia dokonanie identyfikacji minerałów, a dla wybranych minerałów także określenie ich składu chemicznego.

W meteorycie NWA 4505 zidentyfikowaliśmy minerały typowe dla chondrytów zwyczajnych: oliwin, ortopiroksen, whitlockit, cristobalit, coesyt oraz skalenie reprezentowane głównie przez anortoklaz oraz wysokotemperaturowy plagioklaz, a także grafit. Ponadto zidentyfikowaliśmy ilmenit, geikielit, chromit oraz diament jednak do ich potwierdzenia wymagane są dodatkowe pomiary, które ujawniłyby dużo silniejsze, typowe dla tych minerałów piki ramanowskie. Fazy metaliczne kamacyt i troilit oraz klinopiroksen augit zostały wykryte za pomocą mikroskopii optycznej.

W oparciu o położenia diagnostycznych pików ramanowskich i literaturowych krzywych kalibracyjnych określiliśmy skład oliwinu i ortopiroksenu. Ustaliliśmy, że zawartość fajalitu w oliwinie mieści się w przedziale od 0 do 22% molowych. Ustaliliśmy, że opierając się na literaturowych krzywych kalibracyjnych niepewność określenia zawartości forsterytu w oliwinie wynosi 5% molowych.

W meteorycie NWA 4505 istnieją dwie grupy oliwinów: jedna z wysoką zawartością forsterytu $\text{Fo}_{89-100}\text{Fa}_{0-11}$ i druga z wyższą zawartością fajalitu i mniejszą w stosunku do grupy pierwszej zawartością forsterytu $\text{Fo}_{78-83}\text{Fa}_{17-22}$.

Zawartość ferrosylitu w ortopiroksenie meteorytu NWA 4505 jest w przedziale 6–26% molowych i rozróżnić można dwie grupy piroksenów: jedną z wysoką zawartością ferrosylitu Fs_{17-26} oraz drugą z niższą zawartością ferrosylitu Fs_{6-13} .

Zidentyfikowane minerały są utworzone przez ogółem 15 pierwiastków.

Dobrze zdefiniowane i względnie wąskie linie oliwinu i ortopiroksenu dowodzą ich dobrego uporządkowania sieci krystalicznej. Szersze linie ramanowskie grafitu wskazują na mniejszy stopień porządku jego struktury wewnętrznej, ale i tak jak na grafit pozaziemski jest to struktura uporządkowana dość dobrze.

Wyraźne chondry świadczą o typie petrologicznym 3 lub 4 meteorytu NWA 4505. Dobrze zdefiniowane linie ramanowskie ortopiroksenu i oliwinu świadczą o wyższym typie petrologicznym: 4 lub 5. Jednak w typach 4 i 5 chondrytów zrównoważonych skład oliwinu i ortopiroksenu powinien być jednorodny (Hutchison 2004), a w przypadku meteorytu NWA 4505 mikrospektroskopia Ramana pokazuje, że zawartość Fa w oliwinie i zawartość Fs w ortopiroksenie mieści się nie w oczekiwanym wąskim, ale przeciwnie, w szerokim zakresie wartości Fa i Fs w tych krzemianach. Oznacza to, że NWA 4505 może być chondrytem niezrównoważonym i jego typ petrologiczny może należeć do jednego z podtypów z zakresu od 3.0 do 3.4. Do rozstrzygnięcia typu petrologicznego meteorytu NWA 4505 konieczne są dalsze badania: mikrostruktury, badania płytek cienkich w świetle przechodzącym spolaryzowanym oraz dalsze badania składu minerałów.

Mikrospektroskopia Ramana i mikroskopia optyczna w świetle odbitym wskazują na podobieństwo meteorytu NWA 4505 do chondrytów L. Jednak szeroki przedział zawartości fajalitu w oliwinie i ferrosylitu w piroksenie ustalony za

pomocą spektroskopii Ramana czynią ostateczną klasyfikację tego chondrytu jako zadanie jeszcze nie zakończone. Zastosowanie analitycznej mikroskopii elektronowej wydaje się niezbędnym.

PODZIĘKOWANIA: Autorzy serdecznie dziękują doktorowi Marcinowi Kozaneckiemu za okazaną pomoc podczas wykonywania pomiarów widm Ramana. Panu Profesorowi Andrzejowi Maneckiemu wyrażamy wdzięczność za zainteresowanie przebiegiem badań oraz za cenne rady dotyczące badań meteorytów.

Literatura

- 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.
- Dodd R.T., 1981, *Meteorites – A petrologic-chemical synthesis*, Cambridge.
- Cimała M., 2007, 2013, www.polandmet.com.
- Gillet P., 2002, *Applications of vibrational spectroscopy to geology*, [w:] *Handbook of Vibrational Spectroscopy. Applications in Industry, Materials and the Physical Sciences*, 4, 3169–3191.
- Gucsik A., Ott U., Marosits E., Karczemska A., Kozanecki M., Szurgot M., 2008, *Micro-Raman study of nanodiamonds from Allende meteorite*, Organic Matter in Universe, Proceedings IUA Symposium No 251 (IUA251). Kwok, S., Sandford, S. (Eds.), 335–339.
- Freeman J.J., Wang A., Kuebler K.E., Haskin L.A., 2003, *Raman spectroscopic characterization of the feldspars – implications for in situ surface characterization in planetary exploration*, Lunar Planet. Sci., XXXIV: #1676.
- Huang E., Chen H., Huang T., Lin E.H., Ji-Aa-Xu, 2000, *Raman spectroscopic characteristics of Mg-Fe-Ca pyroxenes*, Amer. Mineral., 85:473–479.
- Hurnik B., Hurnik H., 2005, *Materia kosmiczna na Ziemi, jej źródła i ewolucja*. Poznań.
- Hutchison R., 2004, *Meteorites – A petrologic, chemical and isotopic synthesis*, Cambridge.
- Jakubowski T., Karczemska A.T., Kozanecki M., Gucsik A., Stanishevsky A., Mitura S., 2009, *Micro-Raman spectroscopy of diamonds from hot desert ureilites*, Lunar Planet. Sci.Conf., XXXX: Abstract #1382.
- Jakubowski T., 2010, *Analiza odmian węgla w materii pozaziemskiej*, Rozprawa doktorska, Politechnika Łódzka, Łódź.
- Karczemska A.T., Kozanecki M., Szurgot M., Sokołowska A., Mitura S., 2007, *Raman spectroscopy studies of meteoritic diamonds*, Diamonds Rel. Materials, 16, 781–783.
- Karczemska A.T., 2010, *Diamonds in meteorites–Raman mapping and cathodoluminescence studies*, J. Achiev. Materials Manufact. Eng., 43, 94–107.
- Kuebler K.E., Jolliff B.L., Wang A., Haskin A., 2006, *Extracting olivine (Fo-Fa) compositions from Raman spectral peak positions*, Geochim. Cosmochim. Acta, 70:6201–6222.
- Maneck A., 2004, *Encyklopedia minerałów z polskim i angielskim słownikiem nazw. Minerality Ziemi i materii kosmicznej*, Kraków.
- Maneck A., 2010, *Meteoryty. Oblicza gości z kosmosu*, Kraków.
- Mason B., 1962, *Meteorites*, New York.
- Nagy B., 1975, *Carbonaceous meteorites*, Amsterdam.
- Norton O.R., 2002, *The Cambridge Encyclopedia of Meteorites*, Cambridge.
- Smith E., Dent G., 2005, *Modern Raman spectroscopy – A practical approach*, Chichester.
- Stucki A., Reusser E., 1999, *Spektroskopia ramanowska w badaniach meteorytów*, Meteoryt 2. 11–13.

- Szurgot M., Karczemska A., Kozanecki M., 2006, *Extraterrestrial diamonds*, [w:] *Nanodiam*, Mitura S. et al. (Eds.), Warszawa, 259–287.
- Szurgot M., Polański K., Kozanecki M., 2007, *Kompleksowe zastosowanie metod analitycznych do badań chondrytów*, Materiały III Seminarium Meteorytowego Olsztyn 2005, Sosnowiec. 93–98.
- Szurgot M., Polański K., 2007, *Microscopic investigations of Gold Basin and El Hammami chondrites*. Sci. Bull. Techn. Univ. Lodz, Physics, 28:79–94.
- Szurgot M., Polański K., Krystek M., 2008, *Electron and optical microscopy studies of extraterrestrial minerals in NWA 4047 meteorite*, Cryst. Res. Technol., 43:656–665.
- 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., Kozanecki M., 2009, *Spektroskopia Ramana w badaniu meteorytów NWA 4039 i NWA 1465*, Acta Societatis Meteoriticae Polonorum, 1, 151–155.
- Szurgot M., Kozanecki M., Karczemska A., Mitura S., 2009b, *Zastosowanie spektroskopii Ramana w badaniu minerałów z wybranych meteorytów*, Acta Societatis Meteoriticae Polonorum, 1, 156–160.
- Szurgot M., 2009, *Identyfikacja minerałów nowego ureilitu NWA XXX za pomocą spektroskopii Ramana*, Acta Societatis Meteoriticae Polonorum, 1, 142–145.
- Szurgot M., Tsydel I., 2011, *Zastosowanie spektroskopii Ramana do identyfikacji minerałów meteorytu NWA 4967*, Acta Societatis Meteoriticae Polonorum, 2, 158–170.
- Szurgot M., Polański K., Kosiński J.W., 2011, *Microscopic studies of Al Haggounia 001 meteorite*, Sci. Bull. Techn. Univ. Lodz, Physics, 32:65–74.
- Szurgot M., Tomasik A., 2013, *Micro-Raman Spectroscopy of HAH 286 Eucriite*. Lunar Planet. Sci. Conf., XXXIV: Abstract #1335.
- Szurgot M., 2013, Praca w przygotowaniu.
- Wang A., Jolliff B.L., Haskin L.A., Kuebler K.E., Viskupic K.M., 2001, *Characterization and comparison of structural and compositional features of planetary quadrilateral pyroxenes by Raman spectroscopy*, Amer. Mineral., 86, 790–806.