

Marian SZURGOT<sup>1</sup>

# Badania mikroskopowe ureilitu NWA XXX

## Microscopic Investigations of NWA XXX Ureilite

**Abstract:** New NWA XXX ureilite found in 2006 was investigated by optical microscopy in reflection and in transmission. Olivines, pigeonite, metal veins and dots, and carbon phases have been revealed and their features and distribution studied. Twinning of pigeonite, reduction rims, and poikilitic inclusions of olivine in large pigeonite crystals have been identified and characterized. NWA XXX meteorite belongs to olivine-pigeonite ureilites.

**Keywords:** optical microscopy, extraterrestrial matter, ureilite, meteorite

### Wstęp

Klasyczna mikroskopia optyczna jest cennym źródłem informacji o materii pozaziemskiej. W badaniach meteorytów prowadzonych w Politechnice Łódzkiej odgrywa ważną rolę, zwłaszcza w połączeniu z innymi metodami analitycznymi, głównie spektroskopią ramanowską i analityczną mikroskopią elektronową (Szurgot i in. 2007; Szurgot i in. 2008a, b; Szurgot i in. 2009a, b). Mikroskopia optyczna jest nadal podstawowym narzędziem badawczym minerałów ziemskich i kryształów syntetycznych (Szurgot 2010a, b). Pozaziemskie fazy węgla, zwłaszcza diament w ureilitach i chondrytach to fascynujący obszar zainteresowań badaczy meteorytów (Szurgot i in. 2006; Gucsik i in. 2008; Karczemska i in. 2007; Karczemska 2010; Jakubowski 2010).

Meteoryt NWA XXX odkryty w 2006 roku, został wstępnie sklasyfikowany jako ureilit (Cimała inf. ustna 2007). Dotychczasowe badania tego meteorytu objęły jego skład pierwiastkowy i mineralny (Szurgot 2009a, b), analizę faz węglowych, w tym skład izotopowy węgla (Karczemska i in. 2008). Celem niniejszej pracy było zbadanie mikrostruktury i tekstury meteorytu NWA XXX za pomocą mikroskopii optycznej.

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

## Metody badań

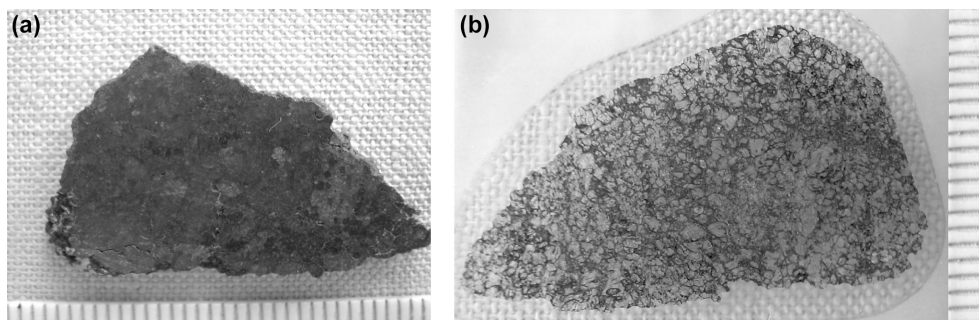
Badania mikrostruktury meteorytu prowadzono w świetle odbitym wykorzystując mikroskop optyczny Epignost firmy Zeiss oraz w świetle przechodzącym spolaryzowanym, używając mikroskopu polaryzacyjnego Polam 2. Rejestrację struktur powierzchniowych prowadzono także stosując elektronowy mikroskop skaningowy 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). Badania prowadzono na dwu okazach meteorytu: wypolerowanej grubej płytki płasko-równoległej oraz płytki cienkiej o standardowej grubości 0,03 mm (rys. 1).

## Wyniki

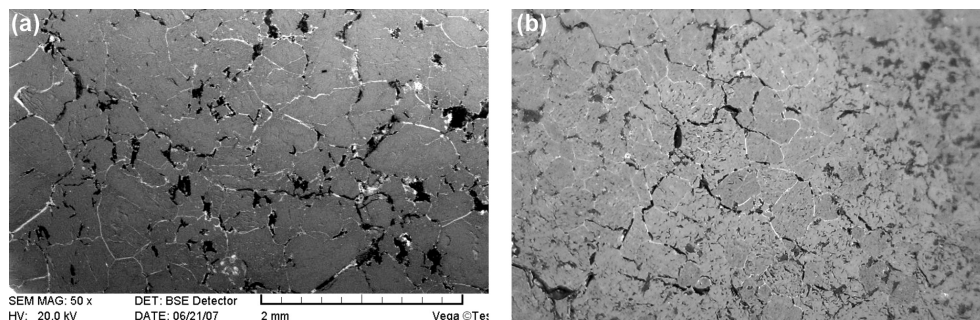
Płytkę grubą badanego ureilitu zaprezentowano na rysunku 1a, a płytkę cienką na rysunku 1b. Ogólny wygląd tekstury meteorytu ujawnia obraz BSE ze skaningowego mikroskopu elektronowego (rys. 2a) oraz obraz z mikroskopu optycznego do światła odbitego (rys. 2b).

Obrazy optyczne i obrazy BSE meteorytu pokazują, że jest on achondrytem zbudowanym z różnych minerałów (rys. 2). Tekstura meteorytu widoczna na obu obrazach jest typowa dla ureilitów. Cechą charakterystyczną tej grupy meteorytów jest obecność w głównej masie meteorytu dobrze rozróżnialnych kryształów oliwinów i piroksenów, na łączeniach których są obecne spękania, żyłki tlenków żelazo-niklowych i troilitu, a także różne fazy węgla (rys. 3–6).

Analizowane w poprzedniej pracy (Szurgot 2009a) widma EDS z różnych mikroobszarów tego ureilitu wykazały obecność typowych dla ureilitów minerałów: oliwinu  $(\text{Mg,Fe})_2[\text{SiO}_4]$  o składzie  $\text{Fa}_8\text{Fo}_{92}$ , klinopiroksenu pigeonitu (piroksenu wapniowego  $(\text{Mg,Fe}^{2+},\text{Ca})_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$ ), o dużej zawartości enstatytu i sumarycznym składzie  $\text{En}_{82}\text{Fs}_{11}\text{Wo}_7$  oraz różnych faz węgla w otoczeniu oliwinowo-piroksenowym. Występujący w składzie pigeonitu skrót En oznacza enstatyt



**Rys. 1.** (a) Płytkę grubą, (b) płytkę cienką ureilitu NWA XXX. Na krawędziach fotografii widoczna skala milimetrowa.



**Rys. 2.** (a) Obraz BSE, (b) obraz optyczny ureilitu NWA XXX z widocznymi minerałami tworzącymi strukturę meteorytu. Dominują duże kryształy dwu głównych minerałów meteorytu: oliwinu i piroksenu (minerały szare). Granice pomiędzy kryształami tworzą strefy wypełnione utlenionym kamacytem (jasne żyłki) zmieszany z troilitem oraz fazami węgla (czarne żyłki i plamki). (a) Skala 2 mm. Pole widzenia: (a) 4,7×2,8 mm, (b) 9×6 mm.

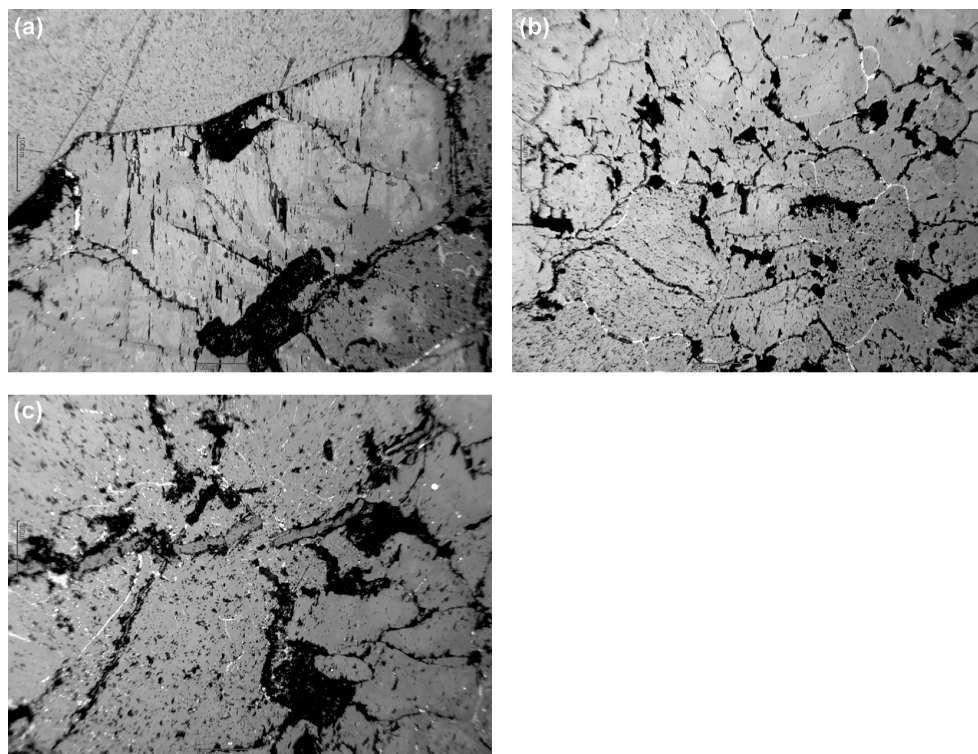
$Mg_2[Si_2O_6]$ , Fs ferrosilit  $Fe_2[Si_2O_6]$ , a Wo wollastonit  $Ca_3[Si_3O_9]$ . Ten pigeonit zawiera 82% mol. enstatytu, 11% ferrosilitu oraz 7% wollastonitu. Oliwin zawiera 8% mol. fajalitu (Fa,  $Fe_2[SiO_4]$ ) oraz 92% forsterytu (Fo,  $Mg_2[SiO_4]$ ).

Nieinwazyjne badania metodą mikrospektroskopii Ramana ureilitu NWA XXX pozwoliły zidentyfikować oliwin ( $Fa_3Fo_{97}$ ) i ortopiroksen  $(Mg,Fe)_2[Si_2O_6]$  oraz zidentyfikować współobecne fazy węgla grafit oraz diament, oczekiwane dla tej grupy achondrytów (Szurgot 2009b, Karczemka i in. 2008).

Jak pokazuje analiza średniej zawartości pierwiastków, oliwiny i pirokseny (klinopiroksen pigeonit i ortopiroksen bronzyt) stanowią 96% masy ureilitu NWA XXX, a fazy węgla około 2,8% masy meteorytu (Szurgot 2009a). Wcześniejsze badania tego meteorytu (Szurgot 2009a) wykazały, że ureilit NWA XXX jest achondrytem oliwinowo-piroksenowym, ale nie rozstrzygnęły czy należy do grupy oliwinowo-pigeonitowej czy do grupy oliwinowo-ortopiroksenowej. Prezentowane w tej pracy wyniki pokazują, że jeden z dwu wykrytych wcześniej piroksenów zdecydowanie dominuje i jest to klinopiroksen pigeonit. Dlatego ureilit NWA XXX można przyporządkować do grupy oliwinowo-pigeonitowej.

Obserwacje mikroskopowe w świetle odbitym dowodzą, że w ureilicie NWA XXX, w oparciu o stopień gładkości powierzchni, tj. w oparciu o różnice w reliefie powierzchni i zawartości wtrąceń można wstępnie odróżnić oliwin od pigeonitu (rys. 3, 4 i 5). Ta ciekawa obserwacja wymaga jeszcze więcej danych doświadczalnych do jej pełnego potwierdzenia i wyjaśnienia, ale wskazuje na dużą użyteczność klasycznej mikroskopii optycznej i wykorzystania światła odbitego. Występowanie tego efektu może być skutkiem różnej twardości oliwinu i piroksenu oraz różnic w łupliwości oliwinu i piroksenu: dobrej łupliwości piroksenu i jej braku w oliwinie (Przylibski 2011). Niewielkie różnice współczynnika odbicia oliwinu i piroksenu z ureilitu NWA XXX mogą także prowadzić do rozróżnienia tych minerałów podczas obserwacji mikroskopowych meteorytu w świetle widzialnym.

Pigeonit jest dominującym nie tylko piroksenem, ale również minerałem głównym ureilitu NWA XXX. Zawartość pigeonitu w NWA XXX jest duża, porówny-

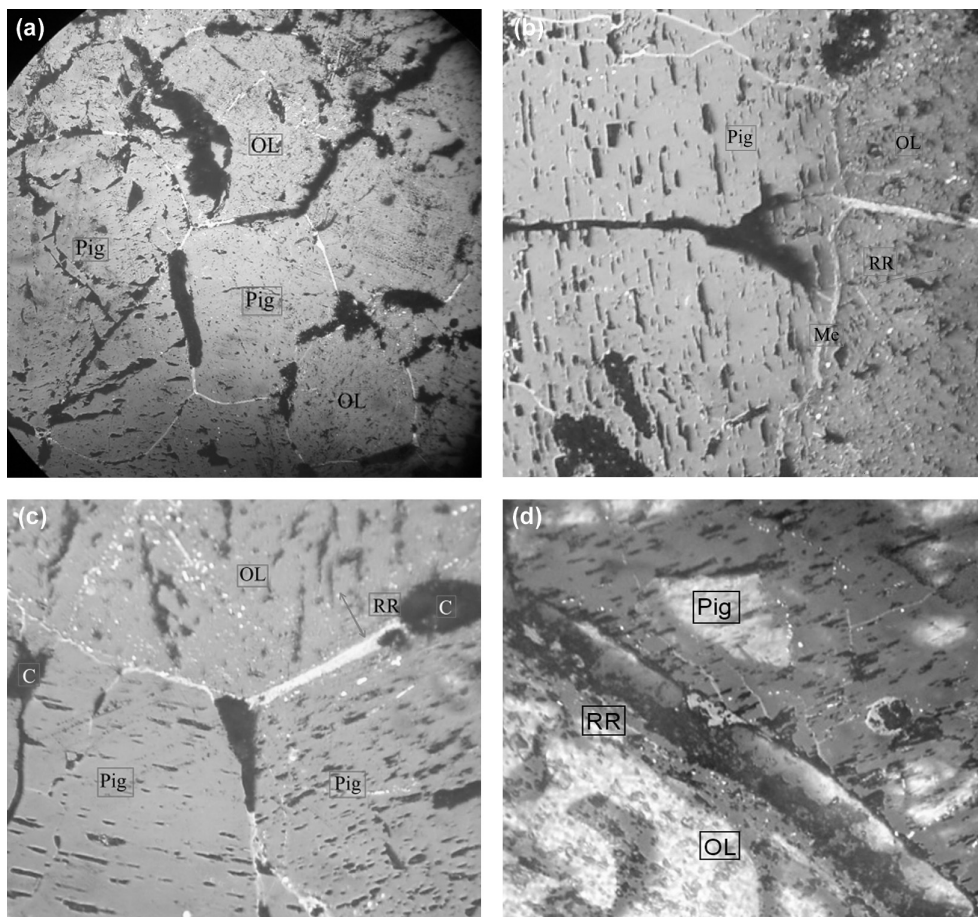


**Rys. 3.** Tekstura ureilitu NWA XXX widziana pod mikroskopem optycznym w świetle odbitym. Obszary o gładkiej powierzchni z mniejszą zawartością wtrąceń to pigeonit. Oliwin jest zlokalizowany w obszarach mniej gładkich z większą zawartością wrostków. Ciemne wrostki wewnątrz kryształów oliwinu i piroksenu to fazy węgla, jasne żyłki i kropki przy granicach oraz wewnątrz kryształów to utleniony kamacyt. Ciemnoszare wstęgi na obrazie (c) to grafit wstęgowy. Pole widzenia: (a), (c) 0,8×0,6 mm, (b) 2×1,5 mm.

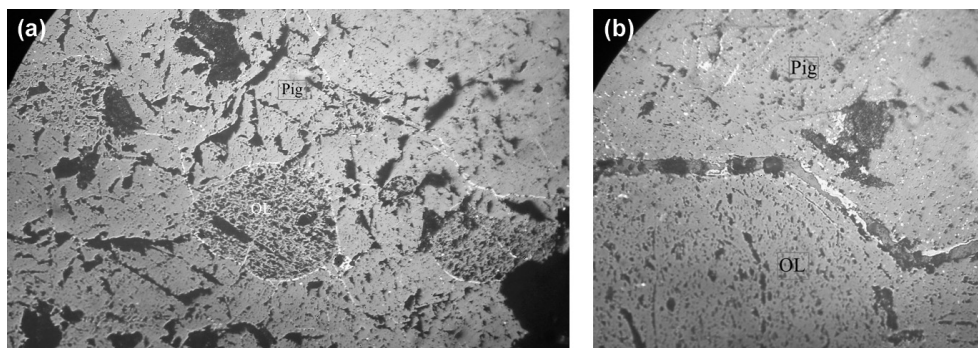
walna lub nawet większa niż zawartość oliwinu, co jest wyjątkowe w ureilitach, ponieważ zwykle jest odwrotnie i oliwiny dominują. W ureilicie NWA XXX można zaobserwować poikilitowe kryształy oliwinów, wbudowane w duże kryształy pigeonitu (rys. 5a, 6b).

Metal, utleniony kamacyt, jest w ureilicie NWA XXX rozmieszczony w typowych dla ureilitów miejscach: w przestrzeniach między kryształami, wzdłuż granic kryształów jako żyły, wewnątrz kryształów oliwinów, rzadziej piroksenów, jako kropki i żyłki, zwykle wzdłuż linii spękań oraz w oliwinach w pobliżu granic kryształów w strefie redukcyjnej (RR) (rys. 2–5). W ureilicie NWA XXX, podobnie jak i w innych ureilitach, pigeonit nie ujawnia strefy redukcyjnej lub jest ona bardzo mała. Rozmiar kropek kamacytu zmierzonych przy pomocy mikroskopu optycznego wynosi 2–5  $\mu\text{m}$ , szerokość żył kamacytu znaczących granice kryształów 3–30  $\mu\text{m}$ .

Zastosowana w niniejszej pracy technika płytek cienkich jest ważną metodą analizy petrograficzno-mineralogicznej skał ziemskich i pozaziemskich. Przy typowych grubościach szlifów 0,03 mm, wiele minerałów jest przezroczystych dla światła



**Rys. 4.** Rozkład mineralów w meteorycie NWA XXX. Pig – pigeonit, OL – oliwin, C – faza węgla, Me – metal, RR – obszar strefy redukcji. Rys. (a) i (c) ujawnia typowe dla ureilitów potrójne łączenia kryształów. (a), (b), (c) Obrazy w świetle odbitym, (d) obraz w świetle odbitym i przechodzącym. Pole widzenia: (a) 1,6×1,6 mm, (b) 0,55×0,55 mm, (c) 0,35×0,32 mm, (d) 0,35×0,35 mm.

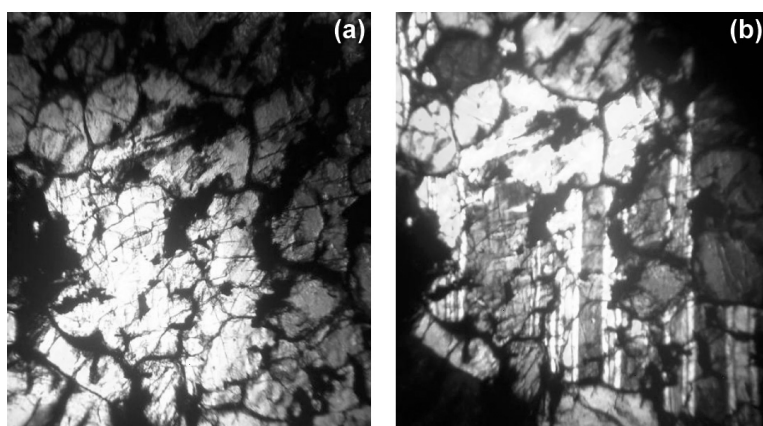


**Rys. 5.** Rozkład mineralów w meteorycie NWA XXX. Pig – pigeonit, OL – oliwin. Obrazy w świetle odbitym. Obraz (a) ujawnia poikilitowo wbudowane kryształy oliwinów wbudowane w duży kryształ pigeonitu, a obraz (b) zygawkatą granicę kryształów oraz obecność kamacytu w postaci jasnych kropek wewnątrz kryształu pigeonitu i żył wzdłuż granicy kryształów. Pole widzenia: (a) 1,5×1 mm, (b) 0,65×0,58 mm.

widzialnego, a ich fizyczne charakterystyki, takie jak barwa interferencyjna, dwójłomność, typ wygaszenia optycznego, morfologia kryształów, zbliźniczenia i płaszczyzny łupliwości umożliwiają identyfikację składników skał pod mikroskopem polaryzacyjnym w świetle spolaryzowanym przechodzącym i odbitym.

Płytkę ciekłą meteorytu NWA XXX pokazuje rysunek 1b, a minerały, które tworzą tę pozaziemską skałę widziane pod mikroskopem polaryzacyjnym w płycie cienkiej zaprezentowano na rysunku 6. Rysunek 6a pokazuje mikrostrukturę skały w świetle przechodzącym niespolaryzowanym, a rysunek 6b ukazuje ją w świetle przechodzącym, spolaryzowanym, przy skrzyżowanych polaryzatorach. Podobnie jak pod mikroskopem optycznym do światła odbiciowego i mikroskopem elektronowym skaningowym, widać względnie duże kryształy (1–2 mm) oliwinów i piroksenów jednoskośnych (pigeonitu). Pigeonit wykazuje skośne wygaszenie światła, zbliźniczenia oraz regularny układ linii spękań (rys. 6a, b). Rysunek 6b ujawnia duże bliźniaki pigeonitu oraz dokumentuje znaczny objętościowy udział pigeonitu w oliwinowo-pigeonitowej populacji kryształów. W świetle przechodzącym widać także, że niektóre pigeonity poikilitowo obrastają mniejsze kryształy oliwinów (rys. 6b), podobnie jak to ujawniono pod mikroskopem do światła odbitego (rys. 5a). Oliwiny wykazują proste wygaszenie światła i nieregularne linie spękań (rys. 6a). W ureilicie NWA XXX stwierdzono typowe dla oliwinów i pigeonitu barwy interferencyjne.

Obecność spękań w oliwinach i piroksenach oraz występowanie falistego wygaszenia światła w niektórych kryształach piroksenów i oliwinów dowodzi, że meteoryt ten doznał znacznego szoku ciśnieniowego. Diamenty wykryte w tym meteorycie za pomocą mikrospektroskopii Ramana (Karczemska i in. 2008; Szurgot 2009b), są prawdopodobnie efektem krótkotrwałych gigantycznych ciśnień wytwarzanych podczas zderzeń kosmicznych, jakich doświadczył ten ureilit.



**Rys. 6.** Rozkład minerałów w meteorycie NWA XXX. Obrazy tego samego fragmentu meteorytu w świetle przechodzącym spolaryzowanym. (a) Polaryzatory ustawione równolegle, (b) skrzyżowane. Obraz (a) ujawnia regularną sieć spękań charakterystyczną dla piroksenów oraz nieregularne spękania wewnątrz kryształów oliwinów. Obraz (b) ujawnia duże bliźniaki pigeonitów oraz znaczny objętościowy udział pigeonitu w oliwinowo-pigeonitowej populacji kryształów. Pole widzenia: (a), (b) 2×2,2 mm.

Ujawnione w niniejszej pracy cechy charakterystyczne mikrostruktury meteorytu NWA XXX, takie jak m.in. skład mineralny i duży rozmiar kryształów oliwinów i piroksenów, potrójne łączenia kryształów, zakrzywione granice kryształów, zbliżniaczenia pigeonitu, charakterystyczne spękania pigeonitu i oliwinu, obecność strefy redukcyjnej w oliwinie, obecność i rozkład fazy metalicznej i faz węgla są typowe dla skały ultramaficznej, asteroidalnej. Są one w większości zgodne z danymi literaturowymi dla ureilitów monomiktycznych (Berkley i in. 1980; Berkley i in. 1976; Goodrich 1992; Goodrich 2004; Hutchison 2004, Marvin i Wood 1972; Mittlefehldt i in. 1998; Neuvonen i in. 1972; Takeda 1986; Vdovykin 1970; Wlotzka 1972). Wykryta struktura poikilitowa w NWA XXX może być podstawą do przyporządkowania tego achondrytu do ureilitów poikilitowych. Pewne cechy meteorytu NWA XXX, takie jak występowanie niejednorodności w postaci jaśniejszych i ciemniejszych obszarów oraz dostrzegalnych różnic w rozmiarze kryształów w różnych fragmentach meteorytu wskazują, że nie jest on ureilitem jednorodnym, a może być nawet ureilitem polimiktycznym. Dominacja pigeonitu w stosunku do oliwinu wyróżnia ten nowy meteoryt, czyni go ureilitem unikalnym, niezwykle ciekawym pozaziemskim obiektem badań.

## Wnioski

Klasyczna mikroskopia optyczna umożliwiła dokonanie identyfikacji minerałów nowego ureilitu, analizy ich właściwości fizycznych oraz rozkładu przestrzennego. Pozwoliła sklasyfikować ten meteoryt jako ureilit oliwinowo-pigeonitowy. Meteoryt NWA XXX jest prawdopodobnie monomiktycznym ureilitem typowym, ale wykryta struktura poikilitowa może być podstawą do jego przyporządkowania do ureilitów poikilitowych. Nie jest również do końca pewne, czy nie jest to ureilit polimiktyczny. Dominującym minerałem meteorytu NWA XXX jest pigeonit, a nie oliwin, co wyróżnia ten ureilit i czyni go unikalnym.

## Podziękowania

Dziękuję dr. Krzysztofowi Polańskiemu za wykonanie zdjęć meteorytu pod skaningowym mikroskopem elektronowym oraz Michałowi Jankowiakowi za wykonanie płytki cienkiej meteorytu. Marcinowi Cimale wyrażam wdzięczność za udostępnienie meteorytu. Profesorowi Łukaszowi Karwowskiemu serdecznie dziękuję za zainteresowanie przebiegiem badań i cenne rady. Profesorowi Tadeuszowi Przylibskiemu serdecznie dziękuję za wnikliwą analizę wyników, za cenne rady i uwagi redakcyjne oraz terminologiczne, a także za wskazanie możliwych przyczyn występowania różnic w reliefie kryształów pigeonitu i oliwinu meteorytu NWA XXX.

Nazwa meteorytu NWA XXX jest tymczasową. Po zatwierdzeniu nazwy oficjalnej przez The Meteoritical Society w Acta Societatis Meteoriticae Polonorum ukaze się notatka informująca o nadaniu numeru badanemu meteorytowi NWA.

## Literatura

- Berkley J.L., Taylor G.J., Keil K., Harlow G.E., Prinz M., 1980. *The nature and origin of ureilites*, Geochim. Cosmochim. Acta, 44. 1579–1597.
- Berkley J.L., Brown IV H.G., Keil K., Carter N.L., Mercier J.-C.C., Huss G., 1976. *The Kenna ureilite: an ultramafic rock with evidence for igneous, metamorphic, and shock origin*, Geochim. Cosmochim. Acta, 40. 1429–1437.
- Goodrich C.A., 1992. *Ureilites: a critical review*, Meteoritics. 27. 327–352.
- Goodrich C.A., 2004. *Ureilitic breccias: clues to the petrologic structure and impact disruption of the ureilite parent asteroid*, Chemie der Erde 64. 283–327.
- Gucsik A., Ott U., Marosits E., Karczewska 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.
- Hutchison R., 2004. *Meteorites-A petrologic, chemical and isotopic synthesis*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Jakubowski T., 2010. *Analiza odmian węgla w materii pozaziemskiej*, Rozprawa doktorska, Politechnika Łódzka, Łódź.
- Karczewska A.T., Kozanecki M., Szurgot M., Sokołowska A., Mitura S., 2007. *Raman spectroscopy studies of meteoritic diamonds*, Diamonds Rel. Materials, 16. 781–783.
- Karczewska A.T., Szurgot M., Kozanecki M., Szyrkowska M.I., Ralchenko V., Danilenko V.V., Louda P., Mitura S., 2008. *Extraterrestrial, Terrestrial and Laboratory Diamonds-Differences and Similarities*, Diamonds Rel. Materials, 17. 1179–1185.
- Karczewska A.T., 2010. *Diamonds in meteorites – Raman mapping and cathodoluminescence studies*, J. Achiev. Materials Manufact. Eng., 43. 94–107.
- Marvin U.B., Wood, J.A., 1972. *The Haverö ureilite: petrographic notes*, Meteoritics. 7. 601–610.
- Mittlefehldt D.W., McCoy T.J., Goodrich C.A., Kracher A. 1998. *Nonchondritic meteorites from asteroidal bodies*, [in:] Planetary Materials, PAPIKE J.J. (Ed.), Reviews in Mineralogy and Geochemistry, Washington D.C. 36. 4-1-4-195.
- Neuvonen K.J., Ohlson B., Papunen H., Häkli T.A., Ramdohr P., 1972. *The Haverö ureilite*, Meteoritics, 7. 515–531.
- Przylibski T.A., 2011. Informacja prywatna.
- Szurgot M., 2009a. *Badania ureilitu NWA XXX za pomocą analitycznej mikroskopii elektronowej*, Acta Societatis Meteoriticae Polonorum, 1. 137–141.
- Szurgot M., 2009b. *Identyfikacja minerałów nowego ureilitu NWA XXX za pomocą spektroskopii Ramana*, Acta Societatis Meteoriticae Polonorum, 142–145.
- Szurgot M., 2010a. *Investigations of impurity striations in potassium bichromate crystals*, Cryst. Res. Technol., 45. 347–354.
- Szurgot M., 2010b. *Investigations of distributions of point defect clusters in lopezite crystals by etch topography*, [in:] Microscopy: Science, Technology, Applications and Education, Mendes-Vilas A., Diaz J. (Eds.), Badajoz.
- Szurgot M., Karczewska A., Kozanecki M., 2006. *Extraterrestrial diamonds*, [in:] 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 Meteorologicznego Olsztyn 2005, Sosnowiec. 93–98.
- Szurgot M., Polański K., Krystek M. 2008a. *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 micro-structure 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.
- Takeda H., 1986/1987. *Mineralogy of Antarctic ureilites and working hypothesis for their origin and evolution*, Earth and Planetary Science Letters, 81. 358–370.
- Vdovykin G.P., 1970. *Ureilites*, Space Sci. Rev., 10. 483–510.
- Wlotzka F., 1972. *Haverö ureilite: evidence for recrystallization and partial reduction*, Meteoritics, 7. 591–600.