

DIAMENTY Z UREILITÓW – BADANIA KATODOLUMINESCENCYJNE METEORYTÓW

DIAMONDS FROM UREILITES – CL STUDY OF METEORITES

MAGDALENA SIKORSKA¹, ANNA KARCZEMSKA², TOMASZ JAKUBOWSKI³, LESZEK GIRO¹

Abstrakt. Analiza katodoluminescencyjna (CL) została wykorzystana do zbadania czterech różnych meteorytów należących do grupy ureilitów: Dhofar 1303, DaG 868, DaG 999 oraz NWA. We wszystkich próbkach odkryte zostały diamenty o różnych barwach luminescencji i widmach CL. Świadczy to o zróżnicowaniu rodzajów centrów luminescencji w sieci krystalicznej badanych ziaren. Głównymi liniami emisyjnymi w diamentach z ureilitów są: 433 ± 5 nm, 615 ± 5 nm i 520 ± 5 nm. Badane diamenty należy zaliczyć do typu Ia. Są to diamenty zawierające podstawienia węgla przez atomy azotu ($>10^{18}$ N/cm³) występujące w formie agregatów, a nie pojedynczych atomów.

Słowa kluczowe: meteoryty, ureility, diamenty, katodoluminescencja.

Abstract. Four different meteorites of the ureilite group have been examined with cathodoluminescence method: Dhofar 1303, DaG 868, DaG 999 and NWA. Diamonds differing both in luminescence colours and CL spectra have been discovered in all the samples. They show diversity of luminescence centres in the crystalline lattice of the grains. Main emission lines in diamonds from ureilites are 433 ± 5 nm, 615 ± 5 nm and 520 ± 5 nm. The diamonds should be classified as Type Ia. They contain substitutions of carbon by nitrogen atoms ($>10^{18}$ N/cm³) occurring in the form of aggregates rather than individual atoms.

Key words: meteorites, ureilites, diamonds, cathodoluminescence.

WSTĘP

Meteoryty pochodzą z Pasa Planetoid, znajdującego się pomiędzy orbitami Marsa i Jowisza. Stanowią w dużej mierze zapis formowania się Układu Słonecznego, co czyni je niezwykle interesującymi skałami dla badań naukowych.

Podział meteorytów jest oparty w głównej mierze na ich genezie (Bischoff, 2001) i dzieli je na dwie duże grupy (fig. 1). Pierwszą są meteoryty niezdyferencjonowane – takie, które po powstaniu w dysku protoplanetarnym nie uległy procesom dyferencjacji (odmieszania, zróżnicowania) i do nich zalicza się meteoryty z szerokiej grupy chon-

drytów. Drugą dużą grupę stanowi bardziej złożony i różnorodny zbiór meteorytów pochodzących z planetoid, które uległy procesom dyferencjacji, tak jak planeta Ziemia.

Meteoryty często zawierają węgiel, który jest niezwykle ważnym pierwiastkiem, związanym z powstaniem życia na naszej planecie. Węgiel istnieje w meteorytach w różnych odmianach alotropowych, w związkach organicznych i różnych minerałach. Niektóre spośród meteorytów, głównie chondryty węgliste, ureility oraz niektóre meteoryty żelazne, zawierają diamenty (Szurgot i in., 2006; Karczemska i in., 2007).

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; e-mail: magdalena.sikorska-jaworowska@pgi.gov.pl

² Politechnika Łódzka, Instytut Maszyn Przepływowych, ul. Wólczańska 219/223, 93-005 Łódź

³ Politechnika Łódzka, Instytut Inżynierii Materiałowej, ul. Stefanowskiego 1/15, 90-537 Łódź

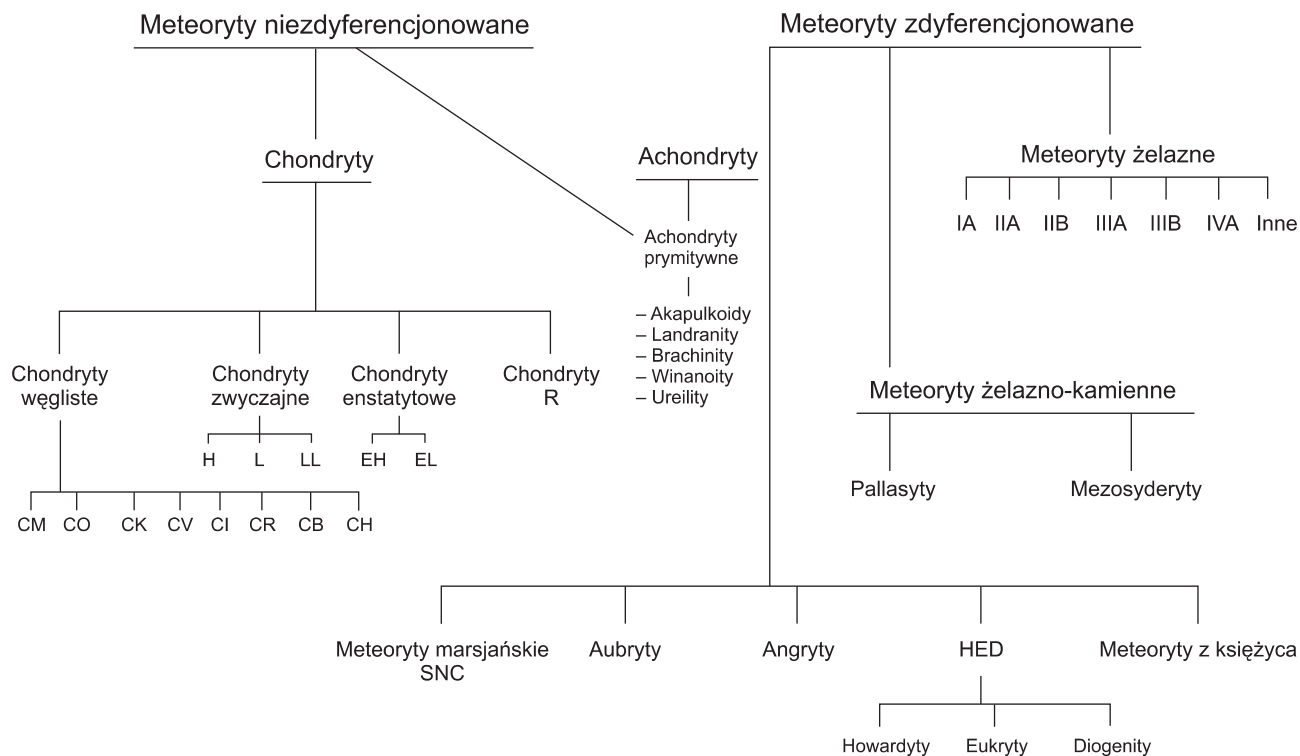


Fig. 1. Współczesny schemat klasyfikacyjny meteorytów według Bischoffa (2001)

Current classification of meteorites according to Bischoff (2001)

Diamenty i grafit występujące w meteorytach mogą być przed-słoneczne (czyli relikty materii, która istniała zanim powstał Układ Słoneczny) bądź słoneczne.

Diamenty znalezione zostały m.in. w achondrytach (ureilitach: np. Novo Urei, DaG 868, Haverro), w chondrytach węglistych (np. Allende) oraz w meteorytach żelaznych (np. Canyon Diablo, Magura). Diamenty w meteorytach (wielkości od nanometrów do milimetra) odkryte zostały po raz pierwszy w meteorycie Novo-Urei w 1888 roku, oraz w meteorycie

Canyon Diablo w 1891 roku. Natomiast nanodiamenty występujące w meteorytach opisano dopiero w 1987 roku (Lewis i in., 1987; Ott, 1993). Są one często nazywane „przed-słonecznymi” bądź „presolarnymi” (ang. *presolar nanodiamonds*), aczkolwiek ich pochodzenie nie jest do końca wyjaśnione.

Pierwszy meteoryt typu ureilitu spadł w 1886 na wieś Novo Urei w Rosji, od której utworzono nazwę tej grupy. W ureilitach znaleziono pierwsze diamenty i od tamtej pory budzą zainteresowanie naukowców.

GENEZA DIAMENTÓW W UREILITACH

Ureility są skałami ultramaficznymi składającymi się głównie z oliwinów i piroksenów (Hutchison, 2004). Przykłady ureilitów, w postaci wypolerowanych płytek, przedstawiono na figurach 2 i 3. Struktura ureilitów zmienia się od grubokrystalicznej do drobnokrystalicznej, tekstura niekiedy bywa kierunkowa. Wyróżnia się dwie grupy ureilitów – monomiktyczne oraz polimiktyczne (zawierające dodatkowo fragmenty innych meteorytów, najczęściej chondrytów). Przestrzenie pomiędzy krzemianami wypełnione są materiałem zawierającym grafit oraz diamenty (fig. 4). Materia

węglista stanowi kilka procent objętości skały (do ok. 6%). Pochodzenie diamentów w ureilitach jest ciągle kwestią nierozstrzygniętą. Najczęściej przyjmowana teoria HPHT (*High Pressure High Temperature*) – wysokich ciśnień oraz wysokich temperatur – zakłada powstanie diamentów podczas impaktów (Urey, 1956; Lipschutz, 1964). Ma ona wielu zwolenników, gdyż większość ureilitów wykazuje co najmniej średni stopień zszokowania (S3). Jednak istnieje inna teoria, która wywodzi pochodzenie diamentów z reakcji podobnych do CVD (*Chemical Vapour Deposition*) (Arrhenius, Alfven, 1971;



Fig. 2. Polerowana płytka ureilitu monomiktycznego NWA 5928

Polished plate of monomictic ureilite NWA 5928



Fig. 3. Polerowana płytka ureilitu monomiktycznego DaG 868

Polished plate of monomictic ureilite DaG 868

Fukunaga i in., 1987; Matsuda i in., 1991). Te dwie teorie są tożsame z ciągle nierozwiązanym problemem pochodzenia tych skał, tzn. czy był to proces przemiany (przetopienia) planetoid stanowiących źródło chondrytów węglistych, czy też powstały one w wyniku kondensacji (podobnie jak materia niezdyferencjonowana).

Ze względu na genezę diamentów możemy je podzielić na pierwotne („złapane“ podczas etapu kondensacji materii chondrytowej) oraz powstałe w sposób wtórny – z przeobrażenia grafitu pod wpływem wysokiego ciśnienia i wysokiej temperatury (głównie w ureilitach i niektórych meteorytach żelaznych) przy procesach impaktowych, czyli w czasie zderzeń.

W meteorytach odkryto różne politypy diamentu, zarówno o regularnej, heksagonalnej, jak i romboedrycznej symetrii, np: regularny, „klasyczny“ diament 3C, heksagonalny lonsdeilit 2H, 4H, 6H, 8H, 15R, 21R (Wang i in., 2008; Wen i in., 2008). Różne politypy diamentu zostały również wytworzone w laboratoriach ziemskich, pod obniżonym ciśnieniem, w procesie CVD. W literaturze wciąż jednak niewiele jest informacji na temat politypów diamentu.

Zastosowanie spektroskopii Ramanowskiej potwierdziło istnienie ogromnej różnorodności węgla w ureilitach, w szczególności różnych politypów diamentu (Jakubowski i in., 2009;

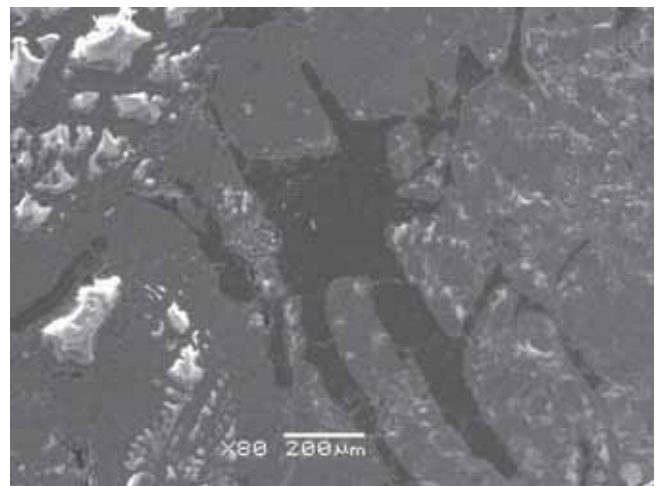


Fig. 4. Obraz (BSE) z mikroskopu elektronowego ureilitu monomiktycznego DaG 868; w centrum widoczne czarne skupienia grafitu

Scanning Electron Microscope image (BSE) of monomictic ureilite DaG 868; black graphite patches visible in the centre

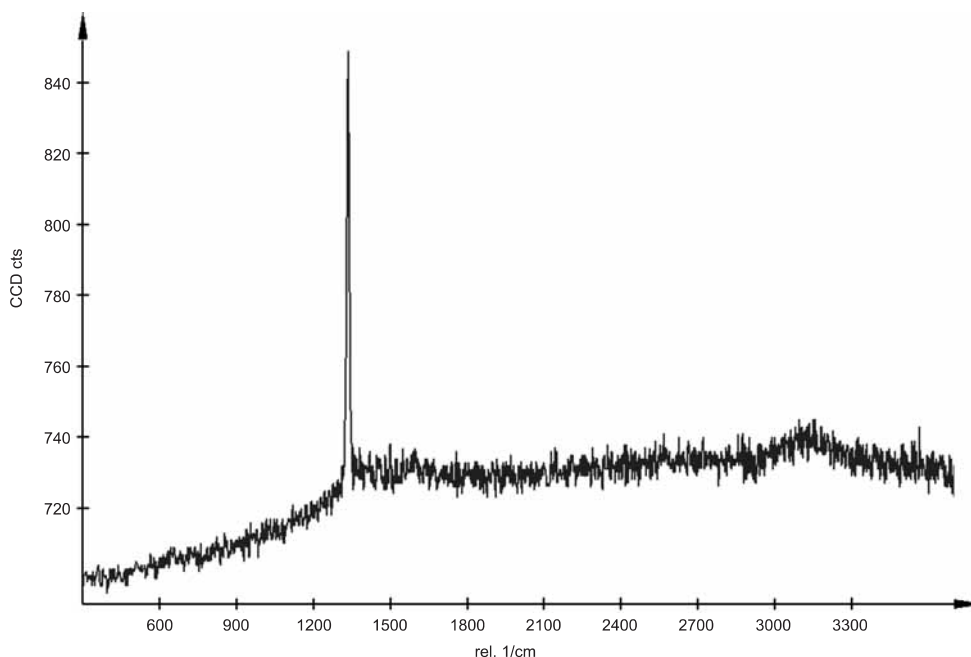


Fig. 5. Typowe dla ureilitu widmo Ramana: pik 1335 cm^{-1} (próbka DaG 868)

Raman spectrum typical for ureilite: peak 1335 cm^{-1} (DaG 868 ureilite)

Karczemski i in., 2009a, b; Karczemski, Jakubowski, 2010; Jakubowski, 2011). Za pomocą techniki mapowania, udało się ukazać różnorodność oraz współistnienie różnych faz węglowych na niewielkim obszarze próbki, między innymi różne odmiany alotropowe węgla oraz politypy diamentu (Karczemski, 2010; Jakubowski, 2011). Ziarnisty monokryształ diamentu posiada charakterystyczny pik 1332 cm^{-1} . Ureility zawierają różne diamenty charakteryzujące się zarówno typowymi pikami 1332 cm^{-1} , jak i przesuniętymi: od około 1300 do 1339 cm^{-1} . Przesunięcia świadczą o istnieniu różnych

politypów diamentu, o zdefektowaniu struktury, rozmiarze ziaren, różnym składzie izotopowym itp. W widmach Ramana piki diamentowe często współistnieją z pikami pochodzącymi od grafitu (1350, 1580, 2700 cm^{-1}), jak również z różnymi innymi pikami pochodzącymi od faz węglowych, takich jak np. karbiny, fulereny bądź węgiel amorficzny. **Figura 5** pokazuje widmo Ramana diamentu w ureilicie DaG 868 z pikiem 1335 cm^{-1} . Badania katodoluminescencyjne diamentów w ureilitach mogą doskonale uzupełnić badania dokonane za pomocą spektroskopii Ramana.

METODYKA

Badania katodoluminescencyjne przeprowadzono w Państwowym Instytucie Geologicznym – Państwowym Instytucie Badawczym w Warszawie.

Standardowe obserwacje katodoluminescencji przy użyciu „zimnej katody” wykonano na polerowanych płytkach cienkich aparatem Cambridge Image Technology CCL 8200 MK3 współpracującym z mikroskopem polaryzacyjnym Nikon Optiphot 2. Stosowano napięcie przyspieszające 15–20 kV, natężenie wiązki elektronowej 300–500 μA , próżnię 0,5–0,2 torra. Kolorowe zdjęcia zrobiono aparatem Microflex UFX-DX.

Badania katodoluminescencji SEM-CL wykonano także na mikroskopie elektronowym LEO 1430 przy użyciu spektrometru katodoluminescencji: SEM-CL VIS View firmy

SIM GmbH – do otrzymywania obrazów wraz z monochromatorem Zeiss-VIS do pomiaru długości pasma luminescencji w zakresie 0–1000 nm.

Podczas badań stosowano napięcie przyspieszające 20 kV o natężeniu 50 μA i prądzie na powierzchni próbki 348–707 pA.

Próbki wybrane do badań to:

- próbka 1 – Dhofar 1303 (ureilit monomiktyczny o stopniu zszokowania S2),
- próbka 2 – Dhofar 1303,
- próbka 6 – DaG 868 (ureilit monomiktyczny o stopniu zszokowania S2),
- próbka 7 – DaG 999 (ureilit polimiktyczny),
- próbka 8 – NWA (niesklasyfikowany ureilit).

KATODOLUMINESCENCJA DIAMENTÓW

Badania właściwości luminescencyjnych diamentów (fluorescencja, fosforescencja) początkowo ograniczały się do oceny jakości diamentów jubilerskich oraz sztucznie otrzymywanych materiałów diamentowych stosowanych w przemyśle. Ostatnie lata przyniosły duże zainteresowanie zastosowaniem katodoluminescencji (CL) w badaniach diamentów różnego pochodzenia: ziemskiego, zidentyfikowanych w materii pozaziemskiej, czy sztucznie wytwarzanych (Shing i in., 1992; Ponahlo i in., 1994). Wyniki badań diamentów, a w szczególności interpretacje widm katodoluminescencyjnych (CL) znaleźć można w wielu pracach, m.in.: Grund i Bischoff, 1999; Panczer i in., 2000; Scherer i in., 2001; Zaitsev, 2001; Gorobets, Rogojine, 2002; Pratesi i in., 2003; Gaft i in., 2005; Gucsik i in., 2009; Pratesi, 2009; Karczewska, 2010.

Diament, minerał, który ma najprostszy skład chemiczny, paradoksalnie charakteryzuje się niezwykle bogac-

stwem centrów luminescencji. Luminescencja w diamentach wywołana jest obecnością defektów w ich sieci krystalicznej, które w przytłaczającej większości związane są z obecnością atomów azotu. Pierwiastek ten może z łatwością podstawiać węgiel dzięki niemal równym ich promieniom atomowym: $r(N) \sim r(C) = 0,77 \text{ \AA}$. Koncentracja azotu w diamentach może dochodzić do 0,5% (Field *vide* Gorobets, Rogojine, 2002). We wspomnianej wcześniej literaturze przedmiotu, wymienia się bardzo wiele różnych centrów luminescencji (rodzajów defektów) w diamentach, które manifestują się charakterystycznymi liniami emisyjnymi (pikami) na widmach CL. Większość z nich stanowią kombinacje atomów azotu i wakancji w sieci krystalicznej diamentów. W naturalnych diamentach stwierdzono obecność niklu, który występuje w pozycjach interstycjalnych lub wywołuje defekty złożone, a także obecność boru (Gorobets, Rogojine, 2002).

WYNIKI BADAŃ

Płytki cienkie z meteorytów obserwowano równolegle w standardowym mikroskopie polaryzacyjnym (PL) i przy użyciu luminoskopu (CL). Na obrazie PL widoczne są duże ziarna piroksenów (enstatyt), oliwiny i plagioklasy oraz przestrzenie międzyziarnowe wypełnione czarną, zbitą substancją węglistą – grafitem (tabl. I, fig. 1). Z uwagi na bardzo drobne rozmiary diamentów (od jednego do kilkudziesięciu mikrometrów), a także ich właściwości optyczne (izotropowość) pozostają one niewidoczne w mikroskopie polaryzacyjnym. Natomiast na obrazach CL z łatwością można je zaobserwować. Bywa, że bardzo drobne ziarna, nie wyróżniające się pojedynczo, ułożone są kierunkowo w masie grafitowej (tabl. I, fig. 2), tworząc delikatne smugi, lub w przypadku większych kryształów są wyraźnie widoczne poszczególne osobniki (tabl. I, fig. 3, 4, 7).

Obserwacje CL ujawniły różne barwy świecenia diamentów. Dotyczy to ziaren występujących w obrębie jednej płytki cienkiej, a nawet jednego skupienia diamentów. Występują obok siebie (tabl. I, fig. 3, 4) diamenty o barwie luminescencji żółtej (najczęstsze), różowej i zielononiebieskiej (najmniej liczne).

Kształt ziaren, choć trudny często do zidentyfikowania, wskazuje ogólnie na ksenomorficzne wykształcenie diamentów. Znacznie wyraźniej ich formę widać w skaningowym mikroskopie elektronowym na obrazach SE (tabl. I, fig. 5, 8), gdzie obserwuje się formy bezkształtne oraz hipautomorficzne, posiadające wyraźne zaczątki formowania się prostych ścian (tabl. I, fig. 8). Na obrazach SEM-CL widać zróżnicowanie intensywności luminescencji poszczególnych diamentów (tabl. I, fig. 6). Pojedyncze osobniki diamentów są bardzo rzadko obserwowane, najczęściej ziarna tworzą agregaty o nieregularnych zarysach.

Różne barwy diamentów widoczne na obrazach CL wskazują na zróżnicowanie rodzajów centrów luminescencji w sieci krystalicznej badanych kryształów. Znalazło to oczywiście odzwierciedlenie w zmiennej formie widm emisyjnych CL, na których obecnych jest wiele linii emisyjnych. Na podstawie porównawczej analizy otrzymanych widm CL wyróżniono 10 linii emisyjnych, o określonych długościach fali ($\pm 5 \text{ nm}$) lub pojawiających się w stałym zakresie (tabl. 1). Z zestawienia tych danych widać, że różnorodność położenia pików oraz ich względna intensywność są bardzo zróżnicowane w badanych próbkach, jak również w obrębie jednej płytki cienkiej. Obok siebie występują ziarna diamentów nie tylko o różnej intensywności danej linii emisyjnej, ale także o zupełnie innym zakresie długości fali poszczególnych pików. W próbce 7 (tabl. I, fig. 3) udało się precyzyjnie zidentyfikować barwy ziaren widoczne w CL (żółte, różowe, zielononiebieskie) i znaleźć te ziarna diamentów na obrazie SE. Wykonano dla nich widma emisyjne CL (fig. 6).

Ponieważ barwa diamentów obserwowana w luminoskopie jest wypadkową linii emisyjnych o różnej długości fali, to widma otrzymane dla różnie świecących ziaren nie mają jednej, charakterystycznej dla danej barwy CL postaci. Widoczna jest natomiast korelacja zakresu widma światła dla maksymalnego/maksymalnych pików a barwą świecenia (fig. 6). Diament o żółtej barwie luminescencji ma maksymalne piki w zakresie żółtego i pomarańczowego odcinka widma światła; ziarno o zielononiebieskiej CL ma najintensywniejszą ze wszystkich diamentów linię emisyjną w zakresie światła zielonego natomiast diament o różowej CL ma maksymalny pik w obrębie fioletu.

Tabela 1

Główne linie emisyjne w widmach CL badanych diamentów z ureilitów
Main emission lines in luminescence spectra of diamonds in analysed ureilites

	425 ±5	440 ±5	510–520	540 ±5	565–585	595 ±5	609 ±5	620 ±5	640 ±5	830 ±5
Dhofar 1303	[nm]									
próbka 1, pkt 1	–	433	511; 523	–	567; 584	–	605	619	644	–
próbka 1, pkt 2	427	–	523	546	–	590	–	–	–	–
próbka 1 (1B), pkt 3	428	–	519	–	–	589	614	–	644	–
próbka 1 (1B), pkt 4	433	445 ?	523	–	–	596	608	–	–	–
próbka 2, pkt 1	–	439	522	548	–	590	605	620	–	–
próbka 2, pkt 2	424	445	521	537	577	592	607	–	–	–
próbka 2, pkt 3	424	444	522	544	579	592	612	–	–	–
DaG 868										
próbka 6, pkt 1	428	440	510	–	–	595	609	619	–	–
próbka 6, pkt 2	–	435	514; 524	–	–	590	605	615	–	–
próbka 6, pkt 3	430	–	–	–	–	594	–	–	–	–
próbka 6, pkt 4	425	435	511	–	–	590	600	614	–	–
DaG 999										
próbka 7, pkt 1	–	434	506; 520	–	585	–	600; 610	626	–	–
próbka 7, pkt 2	430	–	520	–	585	596	–	–	–	–
próbka 7, pkt 3	–	432	–	–	583	–	605	–	–	832
NWA										
próbka 8, pkt 1	424	–	522	–	–	592	605	620	–	836
próbka 8, pkt 2	–	434	–	–	–	590	609	620	641	–
próbka 8, pkt 3	427	440				590	605	617	634	–
próbka 8, pkt 4	428	440	517	536	–	596	609	–	–	831
próbka 8, pkt 5	–	–	516	536	580	–	610	–	–	–

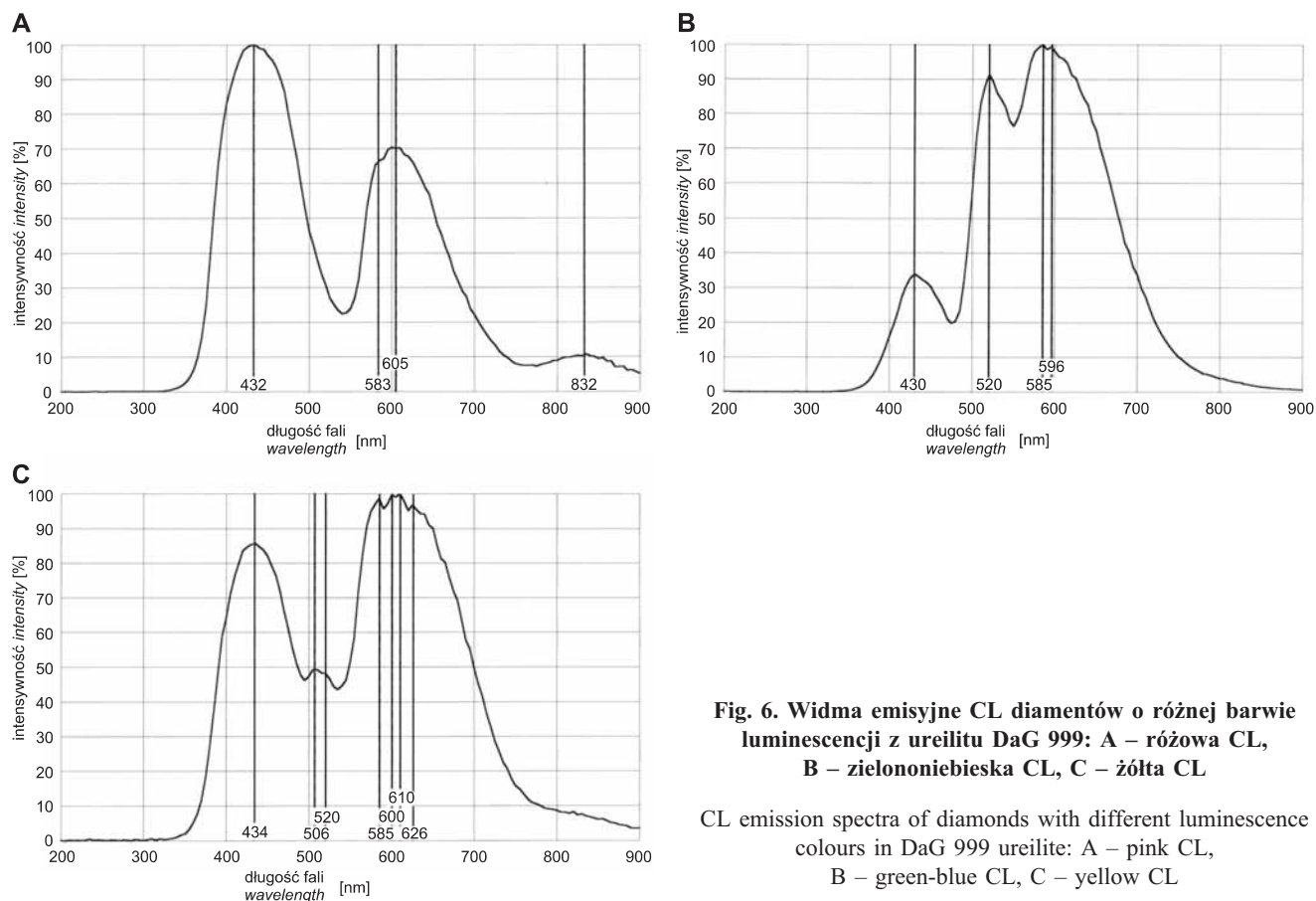


Fig. 6. Widma emisyjne CL diamentów o różnej barwie luminescencji z ureilitu DaG 999: A – różowa CL, B – zielononiebieska CL, C – żółta CL

CL emission spectra of diamonds with different luminescence colours in DaG 999 ureilite: A – pink CL, B – green-blue CL, C – yellow CL

WNIOSKI

Analiza katodoluminescencyjna jest jedną z metod wykorzystywaną obecnie do badania diamentów w meteorytach i razem ze stosowanymi równolegle takimi technikami, jak spektroskopia Ramana oraz SEM EDS prowadzi do dalszego poznawania natury diamentów i ich genezy.

Odnosząc się do klasyfikacji diamentów (Gorobets, Rogojine, 2002), według czynników powodujących defekty w ich sieci krystalicznej (typy Ia, Ib, IIa, IIb), badane diamenty należy zaliczyć do typu Ia. Są to diamenty zawierające pod-

stawienia węgla przez atomy azotu ($>10^{18}$ N/cm³) występujące w formie agregatów, a nie pojedynczych atomów.

Porównując widma CL badanych diamentów z zestawieniem widm diamentów różnego pochodzenia w pracy Grunda i Bischoffa (1999) wyraźnie widać, że badane widma są typowe dla ureilitów i nie można wykluczyć hipotezy, że diamenty te mają szokową genezę. Potwierdza się pogląd wspomnianych wyżej autorów, że głównymi liniami emisyjnymi diamentów w ureilitach są: 433 ± 5 nm, 615 ± 5 nm i 520 ± 5 nm.

LITERATURA

- ARRHENIUS G., ALFVEN H., 1971 — Fractionation and condensation in space. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **10**: 253.
- BISCHOFF A., 2001 — Meteorite classification and the definition of new chondrite classes as a result of successful meteorite search in hot and cold deserts. *Planetary and Space Science*, **49**: 769–776.
- FUKUNAGA K., MATSUDA J., NAGAO K., MIYAMOTO M., ITO K., 1987 — Noble – gas enrichment in vapour – growth diamonds and the origin of diamonds in ureilites. *Nature*, **328**: 141–143.
- GAFT M., REISFELD R., PANCZER G., 2005 — Luminescence spectroscopy of minerals and materials. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- GOROBETS B.S., ROGOJINE A.A., 2002 — Luminescent spectra of minerals. (Reference-book). RPC VIMS, Moskwa.
- GRUND T., BISCHOFF A., 1999 — Cathodoluminescence properties of diamonds in ureilites: further evidence for a shock – induced origin”. 62th Annual Meteoritical Society Meeting, Abstract 5074.
- GUČSIK A., NISHIDO H., NAKAZATO T., NINAGAWA K., 2009 — Cathodoluminescence characterization of nanodiamonds: An application to the meteoritic nanodiamonds. Conference on micro-Raman spectroscopy and luminescence studies in the earth and planetary sciences. *LPI Contribution*, 1473: 42–43.
- HUTCHISON R., 2004 — Meteorites: A Petrologic, Chemical and Isotopic Synthesis. Cambridge Univ. Press.
- JAKUBOWSKI T., 2011 — Analiza odmian węgla w materii pozaziemskiej. Rozprawa Doktorska, Politechnika Łódzka.
- JAKUBOWSKI T., KARCZEWSKA A., KOZANECKI M., GUČSIK A., MITURA S., 2009 — Micro-Raman Spectroscopy of Diamonds from Hot Desert Ureilites. 40th Lunar and Planetary Science Conference, Abstract 1382.
- KARCZEWSKA A., 2010 — Diamonds in meteorites – Raman mapping and cathodoluminescence studium. *J. Achiev. Mater. Manuf. Engineer.*, **43**: 94–107.
- KARCZEWSKA A., JAKUBOWSKI T., 2010 — Raman imaging of ureilitic diamonds. Lunar Planetary Science 2010. Abstract 1639.
- KARCZEWSKA A., JAKUBOWSKI T., KOZANECKI M., TSZYDEL I., JAUSS A., GUČSIK A., 2009a — Micro-Raman spectroscopy of diamonds from JaH 054 and Sahara 98505 Ureilites, Statistic Research. AIP Conf. Proc. August 17, Volume 1163: 59–71.
- KARCZEWSKA A., JAKUBOWSKI T., KOZANECKI M., 2009b — Raman spectroscopy studies of diamond and graphite phases in JaH 054 Ureilite. 72nd Annual Meteoritical Society Meeting, Abstract 5382.
- KARCZEWSKA A., KOZANECKI M., SZURGOT M., SOKOŁOWSKA A., MITURA S., 2007 — Raman spectroscopy studies of meteoritic diamonds. *Diamond & Related Materials*, **16**: 781–783.
- LEWIS B. S., TANG M., WALKER J. F., ANDERS E., STEEL E., 1987 — Interstellar grains in meteorites. *Nature*, **326**: 160–162.
- LIPSCHUTZ M. E., 1964 — Origin of diamonds in Ureilites. *Science*, **141**: 1431–34.
- MATSUDA J., FUKUNAGA K., ITO K., 1991 — Noble gas studies in vapour-growth diamonds: Comparison with Shock-produced diamonds and the origin of diamonds in ureilites. *Geochem. et Cosmochim. Acta*, **7**: 20112–023.
- OTT U., 1993 — Interstellar grains in meteorites. *Nature*, **364**: 25–33.
- PANCZER G., GAFT M., MARFUNIN A., 2000 — Systems of Interacting Luminescence Centers in Natural Diamonds: Laser-Induced Time-Resolved and Cathodoluminescence Spectroscopy. *W: Cathodoluminescence in Geosciences* (red. M. Pagel i inni): 359–372. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- PONAHLO J., HAUBNER R., LUX B., 1994 — Cathodoluminescence (CL) and CL spectra of Microwave Plasma-enhanced CVD diamond. *Mikrochim. Acta*, **116**: 143–156.
- PRATESI G., 2009 — Impact diamonds: formation, mineralogical features and cathodoluminescence properties. *W: Cathodoluminescence and its Application in the Planetary Sciences* (red. A. Gučsik). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- PRATESI G., LO GIUDICE A., VISHNEVSKY S., MANFREDOTTI C., CIPRIANI C., 2003 — Cathodoluminescence investigations on the Popigai, Ries and Lappajärvi impact diamonds. *Amer. Mineral.*, **88**, 11/12: 1778–1787.
- SCHERER T., VAN DEN KERKHOF A.M., HAFNER S.S., 2001 — The cathodoluminescence and EPR characteristics of diamond from impact structures. *W: Cathodoluminescence in Geosciences: New insights from CL in combination with other techniques*. Abstracts. Freiberg University of Mining and Technology.
- SHING Y.H., RICH D.H., POOL F.S., 1992 — Dependence of the cathodoluminescence of diamond films on deposition temperature. *J. Appl. Phys.*, **71**, 12: 6036–6038.
- SZURGOT M., KARCZEWSKA A., KOZANECKI M., 2006 — Extraterrestrial diamonds. Nanodiam. PWN, Warszawa.

- UREY H.C., 1956 — Diamonds, meteorites, and the origin of solar system. *Astrophys. J.*, **125**: 623–637.
- WANG Z., ZHAO Y., ZHA Ch-S., XUE Q., DOWNS R.T., 2008 — X-Ray induced synthesis of 8H. Diamond. *Advanced Materials*, **20**: 3303–3307.
- WEN B., ZHAO J., BUCKNUM M. J., YAO P., LI T., 2008 — First principles studies of diamond polytypes. *Diamond & Related Materials*, **17**: 356–364.
- ZAITSSEV A.M., 2001 — Optical properties of diamond: a data handbook. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

TABLICA I

- Fig. 1. Ureilit Dhofar 1303 (próbka 1) – obraz PL. Czarne skupienia grafitowe pomiędzy ziarnami piroksenów
Ureilite Dhofar 1303 (sample 1) – PL image. Black graphite patches between pyroxene grains
- Fig. 2. Ten sam obiekt co na fig. 1 – obraz CL. W czarnej masie grafitowej widoczne kierunkowo ułożone bardzo drobne ziarna diamentów (strzałka)
The same object as in Fig. 1 – CL image. Very fine diamond grains (arrow) in black graphite groundmass. Oriented arrangement of very fine diamond grains
- Fig. 3. Ureilit DaG 999 – obraz CL. Skupienia drobnych ziaren diamentów (strzałki) o różnej barwie luminescencji: żółte, różowe, zielonkawe. Obok ziarna skaleni o niebieskiej luminescencji
Ureilite DaG 999 – CL image. Accumulations of fine diamond grains (arrows) with different luminescence colours: yellow, pink, greenish. Nearby feldspar grains with blue luminescence are visible
- Fig. 4. Ureilit NWA – obraz CL. Skupienia drobnych ziaren diamentów (strzałka) o różnej barwie luminescencji: żółte, różowe, zielononiebieskie w otoczeniu piroksenów (czerwona luminescencja)
Ureilite NWA – CL image. Accumulations of fine diamond grains (arrow) with different luminescence colours: yellow, pink, green-blue surrounded by pyroxenes (red luminescence)
- Fig. 5. Ureilit NWA – obraz SE. Skupienie słabo wykształconych diamentów w tle grafitowym
Ureilite NWA – SE image. Concentration of poorly developed diamonds in graphite groundmass
- Fig. 6. Ten sam obiekt co na fig. 5 – obraz SEM-CL. Widoczna różna intensywność luminescencji diamentów
The same object as in Fig. 5 – CL image. Different luminescence intensity of diamonds is visible
- Fig. 7. Ureilit DaG 868 – obraz CL. Przestrzeń pomiędzy ziarnami piroksenów wypełniona grafitem i diamentami (strzałka) o żółtej barwie luminescencji
Ureilite DaG 868 – CL image. Intergranular space filled with graphite and diamonds (arrow) showing yellow luminescence colour
- Fig. 8. Ureilit DaG 868 – obraz SE. Skupienie diamentów z widocznymi osobnikami o hipautomorficznym wykształceniu
Ureilite DaG 868 – SE image. Concentration of diamonds with some hipautomorphic individuals

