

Релікти давніх зоряних світів в метеоритах



Віра Семененко

докт. геол.-мін. наук,
професор,
зав. відділом космоекології та
космічної мінералогії
Інституту геохімії навколишнього
середовища НАН України,
м. Київ

Як інформаційний кураж продовжують звучати американські топ-новини про марсіанські здобутки космічного апарату Кьюріосіті на одіозному фоні наших "доленосних" подій: "Український істеблішмент разом зі священниками знову помолились за щасливе майбутнє України..." Ну що ж, давайте хоч на короткий час відірвемося від безпросвітнього середньовіччя — заклинань, ритуалів, шаманства і помандруємо у мінеральний світ зірок.

На початку 1970-тих років вразив образний вислів у російському перекладі американського астрофізика В.А. Фаулера "...все мы вместе в прямом и буквальном смысле являемся частичкой звездного праха". Розуміння його істинності приходило поступово, в міру надходження даних про знахідки в метеоритах, міжпланетному пилу і кометах зерен мінералів, які утворились в інших зоряних світах. Фактично на перехресті сучасних досягнень астрофізики і космохімії виник новий напрямок досліджень, а саме: мінералогія досонячних зерен. Напевно, це вперше, коли вивчення мега- та наносвітів дозволило заглянути в далеке минуле, висвітливши окремі фрагменти еволюції Всесвіту.

Ще в минулому столітті було встановлено, що вуглець і всі важчі за нього хімічні елементи утворюються внаслідок нуклеосинтезу всередині зірок. Кожна зірка є потужним ядерним реактором, в надрах якого формуються не лише хімічні елементи, але і їхній індивідуальний ізотопний склад. Згідно з астрофізичними даними в навколосіткових оболонках червоних гігантів (RG), в асимптотичних гігантських гілках (AGB) або у викидах наднових (SNe) відбувається конденсація новостворених хімічних елементів із газу й утворення мінерального пилу [10,12]. Викиди величезних кількостей ізотопно різноманітного пилу численними зірками у міжзоряний простір зумовлюють формування нових газо-пилових туманностей (рис. 1). Процес утворення Сонця в одній із туманностей близько 4,6 млрд. років тому майже повністю перетворив у плазму досонячну речовину, знищивши ізотопні ознаки її гетерогенності. Наступне охолодження зумовило конденсацію пилових зерен із характерною сонячною ізотопією хімічних елементів.

Питання ізотопної гетерогенності протосонячної туманності хвилювало дослідників ще в середині минулого століття. Думка про те, що не вся туманність була повністю іонізована й переконденсована, сприяла пошуку речових доказів, передусім мінеральних зерен, ізотопний склад яких відрізнявся би від сонячного. Вперше відомості про ймовірну знахідку "зіркового праху" було отримано в кінці 1980-тих років на основі аномального ізотопного складу інертних газів у метеоритному алмазі, муасоніті та графіті [4, 11]. Але вагомим підтвердженням формування їх ізотопного складу в процесі нуклеосинтезу в інших зірках стали результати ізотопії кисню, а потім інших хімічних елементів, зокрема вуглецю й азоту, які суттєво відрізнялись від сонячних співвідношень, а для деяких елементів характеризувались екстремально широкими межами [12]. Ці результати були співзвучними з астрофізичними даними, згідно з якими O-багаті (C/O<1) червоні гіганти виробляють силікатний пил, оксиди і CO, а C-багаті (C/O>1) — вуглецевий пил, зокрема

SiC, C, і нітриди [10, 12]. Знахідки мінералів-носіїв ізотопних аномалій дозволили чітко сформулювати думку про наявність досонячних зерен, які на периферії газо-пилової туманності пережили процес утворення Сонця й увійшли при акреції в склад примітивних метеоритів.

Пошук і діагностика досонячних зерен є одним із найскладніших самостійних завдань сучасної космохімії та мінералогії. Серед відомих на Землі 23 тисяч метеоритів вони присутні лише в кількох десятках примітивних метеоритів, а саме: у вуглистих та нерівноважних звичайних хондритах. Основним носієм досонячних зерен у примітивних метеоритах є тонкозерниста силкатна речовина (рис. 2), структурно-мінералогічні та хімічні характеристики якої свідчать про її ймовірну належність до реліктів пилу протопланетної туманності [3, 8, 9].

Нині в досонячних зернах діагностовані такі мінерали: алмаз, графіт, карбід кремнію (SiC), шпінель- $MgAl_2O_4$, гібоніт- $CaAl_2O_4$, оксид Al, зокрема корунд, оксид Ti, когеніт $(Fe,Ni)_3C$, нітрид кремнію (Si_3N_4) , Ti-, Zr-, Mo-багаті карбіди, камасит (Fe,Ni) , елементне залізо й олівін $(Mg_2[SiO_4])$. Половина з них досить поширені в земних породах, решта — діагностовані як метеоритні або лише як досонячні. Всі досонячні мінерали, окрім алмазу, присутні в мізерних кількостях (від 3 чнб до 10 чнм) і мають розміри від нанометричних до субмікронних [12]. І лише окремі



Рис. 1. Міжзоряна газо-пилова туманність Голова коня в сузір'ї Оріона [13].

зерна графіту і муасоніту досягають 20 мікрометрів (таблиця).

Відносно широкі варіації розмірів зерен, а також фрагментарна форма більшості з досонячних мінералів дозволили зробити висновок про можливість некоректності даних при оцінюванні їхніх розмірів [1]. Доказом цього є дані вивчення рідкісного космічного мінералу гібоніту з хондриту Кримка [1, 6, 8]. В полірованому шліфі метеориту (рис. 3), тобто *in situ*, зерна гібоніту мають округлу форму і розміри $\leq 20 \times 10$ мкм, а зерна, виділені Л. Нітт-

лером хімічним методом (рис. 4), мають фрагментарну форму і значно менші розміри ($\leq 5,5 \times 2$ мкм), що свідчить про їх дроблення в процесі підготовки для ізотопних досліджень. На відміну від інших мінералів алмаз демонструє виняткову сталість розміру зерен. Можна припустити, що саме нерівноважні процеси мінералоутворення в зоряному середовищі та унікальна твердість алмазу зумовили збереження нанометричних зерен впродовж тривалої еволюції космічної речовини [1].

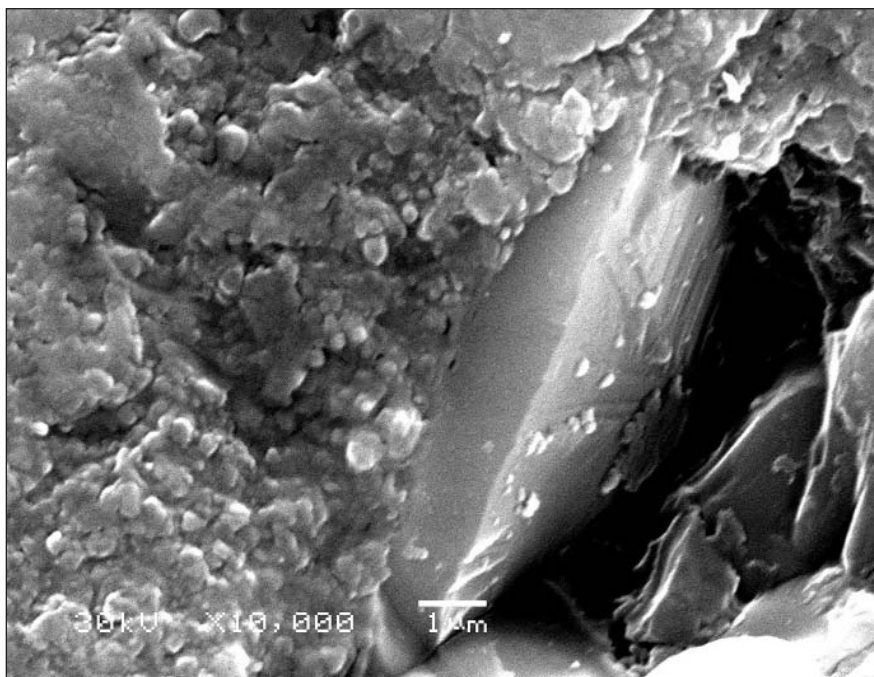


Рис. 2. Сканувальне електронно-мікроскопічне (СЕМ) зображення сколу примітивної тонкозернистої силкатної речовини в хондриті Кримка, яка є носієм досонячних зерен. Речовина має глобулярну будову і вміщує крупний кристал олівіну

Серед діагностованих досонячних мінералів найкраще вивчений карбід кремнію із вуглистої хондриту Murchison (рис. 5), що зумовлено великою масою цього метеориту, яка доступна для комплексного дослідження, а також відносно великими розмірами зерен SiC. Його кристалографічні особливості аналогічні карбиду кремнію вуглецевих зірок і свідчать про низькі тиски і температури конденсації у витоках зіркової речовини [10]. У найбільших індивідуальних зернах SiC проведені ізотопні дослідження для основних елементів багатьох мікроелементів [12]. Вивчені зерна класифіковані на основі ізотопії C, N, Si, а також співвідношень у них $^{26}Al/^{27}Al$. Цікаво, що близько 93% зерен SiC за відношенням $^{12}C/^{13}C$, яке змінюється від 10 до 100, подібні до карбиду кремнію, зареєстрованому адсорбційними спектрометрами у вуглистих зірках. Водночас відношення $^{12}C/^{13}C$ у деяких екзотичних зернах SiC відповідає $10-10^4$. Один із основних компонентів

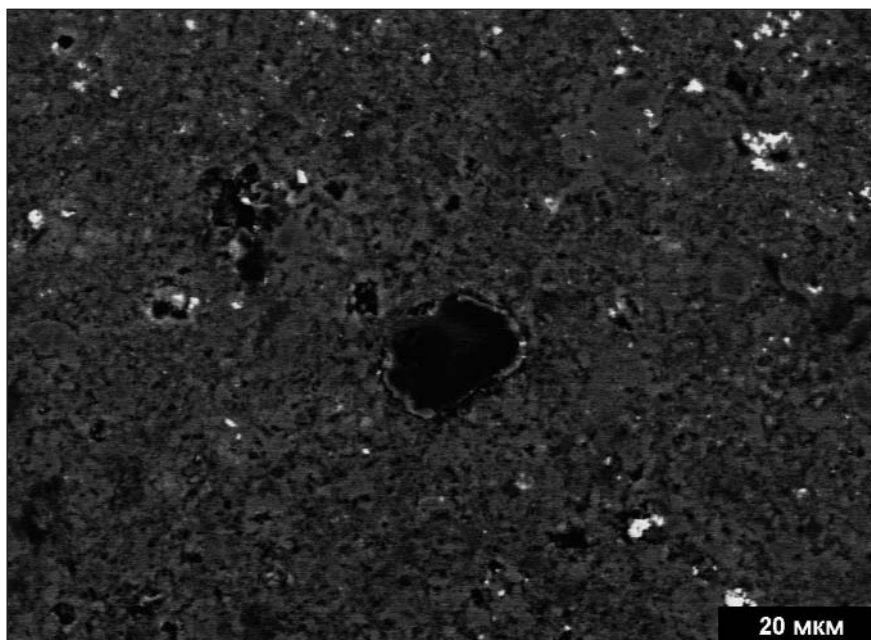


Рис. 3. СЕМ зображення зерна гібоніту із хондриту Кримка в полірованому шліфі [8]. Зерно розташоване в тонкозернистій силікатній речовині метеориту по центру знімка (у відбитих електронах)

— кремній характеризується високим збагаченням важкими ізотопами аж до 200‰ відносно сонячної розповсюдженості, що викликало активну наукову дискусію про специфіку еволюції зірок у Галактиці [12].

Досонячні зерна графіту у вигляді кульок (рис. 6) були знайдені 1990 р. завдяки присутності в них аномально неону [11]. Між розмірами зерен і їхньою щільністю існує зворотна залежність. Найщільніші зерна відрізняються за ізотопним складом С інертних газів. Всередині більшості графітових кульок присутні зерна TiC, карбідів, збагачених Mo і Zr, когеніту, ка-

маситу і заліза. Припускають, що в досонячний період пилові зерна цих мінералів були центрами кристалізації графіту. Індивідуальні зерна графіту мають аналогічні з карбідом кремнію межі співвідношення $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$, хоча характер їх розподілу різний [5, 12]. Водночас у більшості зерен графіту ізотопні співвідношення N близькі до сонячного, що пояснюється змінами його складу в материнських тілах метеоритів або в лабораторних умовах. Численні дослідження свідчать про можливе утворення досонячного графіту як у червоних гігантах, так і в наднових зірках.

Кристали алмазу є найменшими за розміром і найпоширенішими серед інших досонячних мінералів [4]. Через їхні нанометричні розміри провести дослідження індивідуальних зерен поки що неможливо, тому більшість отриманих результатів ізотопії елементів у валовій пробі є складними, суперечливими і важкими для інтерпретації. Єдиним доказом досонячної природи наноалмазів є дані ізотопії Xe-N і Te, і частково Sr та Ba. Водночас ізотопний склад C у валовій пробі наноалмазів аналогічний до сонячного. Припускають [12], що саме наднові зірки породжують досонячні зерна алмазу.

Досонячні зерна надзвичайно рідкісного нітриду кремнію були знайдені завдяки високому вмісту ^{28}Si в SiC-збагаченому залишку хондрита Murchison за допомогою автоматичного іонного зображення [12].

Ізотопні дослідження оксидних мінералів [6, 7] свідчать, що більшість із них утворилися в межах сонячної туманності і лише незначна кількість їх — в O-багатих зірках. На відміну від C-вмісних досонячних зерен оксидні мінерали не вміщують аномальні інертні гази. За ізотопією кисню, а відповідно і за зірковим генезисом, досонячні зерна оксидів класифіковано на 4 групи [7]. До рідкісних знахідок in situ належать досконалі кристали корунду (рис. 7), які були діагностовані в полірованому шліфі метеориту Кримка [2]. На жаль, відсутність даних з ізотопного складу не дозволяють визначити їхню природу. Водночас попередні ізотопні дослідження [6] свідчать про наявність у хондриті зерен корунду досонячного походження.

Субмікронні зерна досонячного олівину ідентифіковані лише в міжпла-



Яків Павленко
доктор фіз.-мат. наук,
головний наук.
співробітник Головної
астрономічної обсерваторії
НАН України,
м. Київ

Коментар до статті В.П.Семененко "Релікти давніх зоряних світів у метеоритах"

Матеріал статті є цікавим для широкого загалу читачів. Я знайшов там кілька нових, раніше невідомих для мене, фактів. Разом з тим, з поля зору автора випадає цікавий факт останніх відкриттів потужних так званих "debris disks", тобто дисків навколо молодих зір, насичених газопиловою матерією, астероїдами та об'єктами малих мас. Існування в цих дисках об'єктів планетарних мас є загальноприйнятим спостережним фактом. Достатньо запитати в google чи SAO/NASA ADS інформацію про "debris disks" і ми отримаємо велику кількість інформації про них. Час існування таких систем невеликий, у частині випадків він буде обмежений часом існування материнської зорі. Звісно, при формуванні екзопланетних систем в 'debris' дисках та самих дисків будуть проходити складні процеси формування мінералів. Зараз численні відкриття наземними комплексами та космічними місіями, зокрема "Кеплер", показують, що існування екзопланетних систем навколо зір є радше правилом, а не винятком.

нетному пилу [12]. Не виключено, що такі малі зерна присутні також у метеоритах, але пошуки їх поки що проводились лише серед зерен розміром ≤ 1 мкм.

Таким чином, сучасні дані мінералогії і космохімії досонячних зерен [4-12] свідчать про великий обсяг надзвичайно складних і тонких досліджень, результати яких хоч і суперечливі, але наближають нас до розгадки таємниць походження нашої Галактики. Вони дозволяють отримати відомості про хімічну еволюцію галактик, природу зірок, про фізико-хімічні процеси в міжзірковому середовищі, в сонячній протопланетній туманності, а також у материнських тілах метеоритів [12]. Суперечливість отриманих даних не є недоліком досліджень, а вказує на великі масштаби невідомого в процесах еволюції речовини Всесвіту.

Результати вивчення досонячних зерен астрофізичними, мінералогічними та космохімічними методами однозначно свідчать про те, що зародження й еволюція твердих тіл Галактики тісно пов'язана з процесами мі-

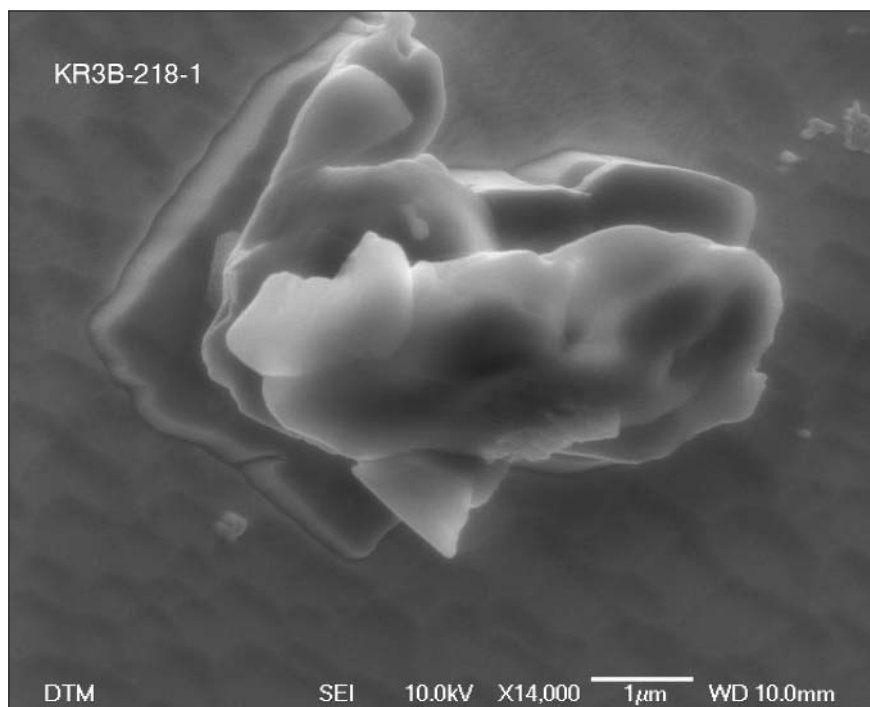


Рис. 4. СЕМ зображення досонячного зерна гібоніту, яке виділене хімічним методом із речовини метеориту Кримка і розміщене на золотій пластинці (у вторинних електронах). Фото люб'язно надане для статті Л. Нітлером

Таблиця. Загальна характеристика досонячних зерен [12]

Мінерал	Розмір зерен	Вміст	Тип зірки
Алмаз	2 нм	1000 чнм	SNe?
Карбід кремнію	0,1-20 мкм	10 чнм	AGB, SNe, J, Ne
Графіт	1-20 мкм	1-2 чнм	SNe, AGB
Оксиди	0,15-3 мкм	1 чнм	RG, AGB, SNe
Нітрид кремнію	0,3-1 мкм	3 чнб	SNe, AGB
Ті-, Fe-, Zr-, Мо-карбіди	10-200 нм		SNe
Камасит, залізо	10-20 нм		SNe
Олівін	0,1-0,3 мкм		

Формування таких систем відбувалось і раніше, — навколо зір попередніх поколінь. На мою думку, саме в "debris" дисках відбувалось формування тих досонячних мінералів, про які пише автор. Відомо декілька поколінь зір в нашій Галактиці, вони формувались у відмінному від сучасного середовищі. До того ж, у більш ранні часи існування Галактики її хімічний склад не був таким однорідним, як зараз. Для мене особисто не викликає сумніву, що зазначені в статті аномалії в мінералах прийшли до нас з досонячних часів.

З іншої сторони, на сьогодні відомо про існування таких екзопланетних систем, які утворилися на місці спалахів Наднових зір. Власне, перше достовірне відкриття першої екзопланетної системи було виконане радіоастрономами **Олександром Волицаном** (Aleksander Wolszczan) та **Дейлом Фрейлом** (Dale Frail) при спостереженні пульсара PSR B1257+12 (http://en.wikipedia.org/wiki/Extrasolar_planet#Confirmed_discoveries). Ця система виникла за дуже екстремальних початкових умов, які відрізняються чи відрізнялись від більшості відомих випадків. Проте, скоріше за

все, процеси мінералоутворення і тут проходили на більш пізніх стадіях еволюції системи, тобто вже після спалаху Наднової зорі. У всякому разі цей канал еволюції існує, — можливо, він є значимим на космологічній шкалі часу, а зараз він явно не є домінуючим.



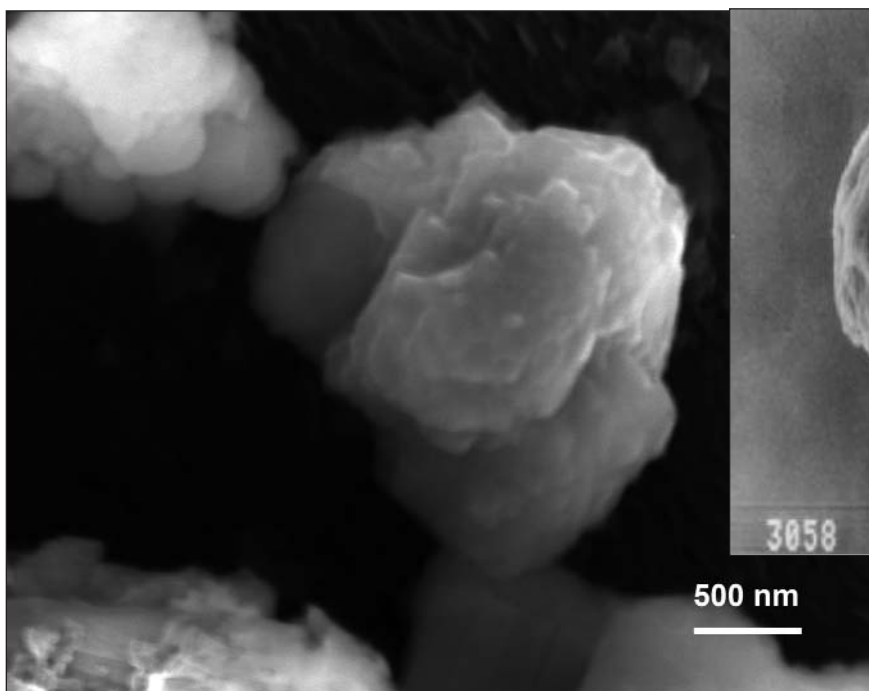


Рис. 5. СЕМ зображення досонячного зерна муасоніту на золотій пластинці після хімічної сепарації із вуглистого хондриту Murchison. Фото люб'язно надане для статті Л. Нітлером

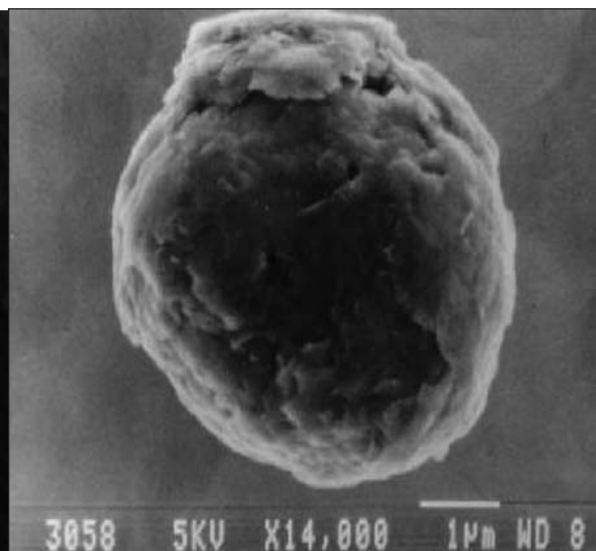


Рис. 6. СЕМ зображення досонячного зерна графіту. Фото із колекції С. Амарі [14]

нералоутворення [1]. Якщо врахувати, що кількість досонячних мінералів нині відповідає першим десяткам, метеоритних — першим сотням, а земних (планетних) — тисячам одиниць, то можна зробити висновок, що розвиток твердих тіл Галактики від нанометричного пилу до планет розміром у тисячі кілометрів супроводжується збільшенням мінеральних видів та кількості їхніх індивідів. Фактично мінералоутворення, яке відбувається в діапазоні температур нижче 2000° К, є одним із фундаментальних і наскрізних процесів структуризації та функціонування баріонної матерії Всесвіту.

Автор вдячна Ларрі Нітлеру з Інституту Карнегі (США, Вашингтон) за люб'язно надані для публікації фото досонячних зерен гібоніту та карбиду кремнію. ■

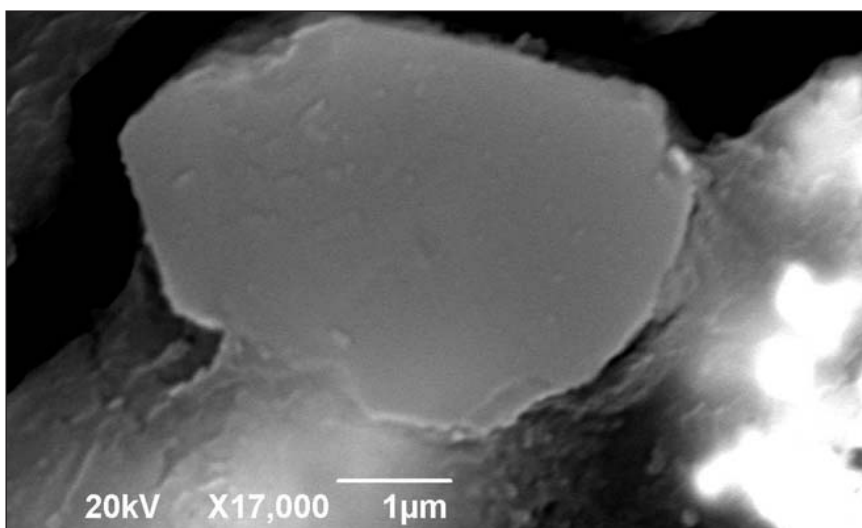


Рис. 7. СЕМ зображення досконалого кристалу корунду ймовірно досонячного походження, яке розташоване в порожнині полірованого шліфа хондриту Кримка [2]

Література

1. Семененко В.П. Мінералогія досонячних зерен. Геохімія та рудоутворення. 2009, №27, с. 92—94.
2. Семененко В.П. Перша знахідка самородного срібла в метеоритах. Зап. Укр. мінерал. тов. 2010, т. 7, с. 58—63.
3. Семененко В.П. Мінералогія пилової компоненти протопланетної туманності. Укр. мінерал. тов., 2011, т. 8, с. 175—178.
4. Anders E., Zinner E.K. Interstellar grains in primitive meteorites: diamond, silicon carbide, and graphite. *Meteoritics*, 1993, v. 28, pp. 490—514.
5. Lodders K., Amari S. Presolar grains from meteorites: Remnants from the early times of the solar system. *Chemie der Erde*, 2005, v. 65, pp. 93—166.
6. Nittler L.R., C.M. O'D. Alexander, R. Gallino et al. Aluminium -calcium- and titanium-rich oxide stardust in ordinary chondrite meteorites. *The Astrophys. Journal*, 2008, v. 682, pp.1450—1478.
7. Nittler L.R., C.M. O'D. Alexander, Gao X., Walker R.M., Zinner E. Stellar sapphires: The properties and origins of presolar Al₂O₃ in meteorites. *Astrophys. J.*, 1997, v. 483, pp. 475—495.

8. Semenenko V.P., Bischoff A., Weber I., Perron C., Girich A.L. Mineralogy of fine-grained material in the Krymka (LL 3.1) chondrite. *Met. Planet. Sciences*, 2001, v. 36, pp. 1067—1085.
9. Semenenko V.P., Jessberger E.K., Chaussidon M., Weber I., Stephan T., Wies C. Carbonaceous xenoliths in the Krymka LL3.1 chondrites: Mysteries and established facts. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2005, v. 69, pp. 2165—2182.
10. Speck A.K., Barlow M.J., Skinner C.J. The nature of silicon carbide: Astronomical observations versus meteoritic evidences. *Met. Planet. Sciences*, 1997, v. 33, pp. 703—712.
11. Survival of presolar material in meteorites. In: *Meteorites and the early Solar system*. Eds.: J.F. Kerridge, M.S. Matthews. The Univ. of Arizona press. Tucson, 1988, p. 13, pp. 927—994.
12. Zinner E.K. Presolar grains. In: *Treatise on geochemistry. Meteorites, comets and planets*. Ed.: A.M. Davis. Elsevier. Pergamon, 2004, pp. 17—39.
13. <http://my.opera.com/FranklinBR/albums/showpic.dml?album=5966432&picture=92952611>
14. <http://www.dtm.ciw.edu/users/nittler/psgtypes.html>