

## СКУЛЬПТУРА ПОВЕРХНІ ТА ХІМІЧНИЙ СКЛАД МІНЕРАЛЬНИХ ЗЕРЕН ПАЛАСИТУ ОМОЛОН

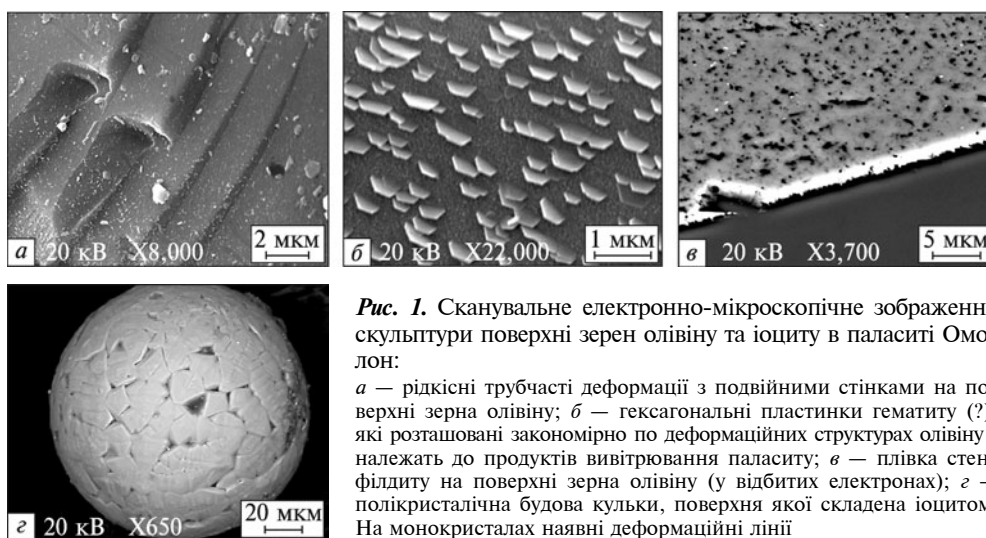
---

*Наведено результати сканувальних електронно-мікроскопічних і енергодисперсійних досліджень скульптури поверхні та хімічного складу мінеральних зерен паласиту Омолон, в якому вперше знайдені графіт, іюцит, кварц і, можливо, авгіт, а також встановлено новий тип деформаційних скульптур. Особливості скульптури поверхні зерен свідчать про злегка нерівноважний ріст мінералів і багатостадійну ударно-метаморфічну історію паласиту.*

---

Паласит Омолон є відносно молодим за земним віком залізо-кам'яним метеоритом. Він упав у Магаданській обл. Росії 16 травня 1981 р. у басейні р. Омолон, знайдений у вигляді індивідуального зразка масою 250 кг у серпні 1982 р. На цей час основна маса метеорита зберігається у Північно-Східному науково-дослідному інституті у м. Магадан [8]. Метеорит класифіковано як представник головної, тобто найпоширенішої групи паласитів [8]. Згідно зі структурно-мінералогічними характеристиками [1], у ньому наявні переважно олівін ( $\text{Fe}_{11,33-12,52}$ ) і нікелісте залізо (камасит, теніт, плесит), у вигляді акцесоріїв — троїліт, хроміт, фосфіди заліза, поодинокі зерна стенфілдиту та гаксоніту, а також є прикмети ударного метаморфізму. Останні засвідчують неодноразові зіткнення паласиту з іншими материнськими тілами в космосі, а саме два інтенсивні співударі, які супроводжувались підвищенням ударного тиску до 25—30 ГПа і температури в основній масі метеорита до 400—450 °С, на окремих ділянках до 1000 °С, а також кілька низькотемпературних співударів у межах 8—13 ГПа [1].

За результатами попередніх електронно-мікроскопічних досліджень поверхні зерен олівіну і нікелістого заліза в паласиті Омолон виділено і систематизовано численні скульптури деформації і нагріву [3], які зумовлені складною ударно-метаморфічною історією материнського тіла метеорита в поясі астероїдів [4]. У цій статті наведено нові результати детальних досліджень особливостей скульптури поверхні, а також хімічного складу зерен олівіну, Са-піроксену, камаситу, теніту, іюциту, хроміту, стенфілдиту, троїліту, самородної міді, кварцу і графіту паласиту Омолон, які були отримані на сканувальному електронному мікроскопі (SEM) марки JEOL JSM-6490LV, обладнаному енергодисперсійним спектрометром Penta FETx3 Oxford Instruments, за напруги струму 20 кВ. При цьому зазначимо, що здебіль-



**Рис. 1.** Сканувальне електронно-мікроскопічне зображення скульптури поверхні зерен олівіну та іоциту в паласиті Омолон:

*a* — рідкісні трубчасті деформації з подвійними стінками на поверхні зерна олівіну; *б* — гексагональні пластинки гематиту (?), які розташовані закономірно по деформаційних структурах олівіну і належать до продуктів вивітрювання паласиту; *в* — плівка стенофілдіту на поверхні зерна олівіну (у відбитих електронах); *г* — полікристалічна будова кульки, поверхня якої складена іоцитом. На монокристалах наявні деформаційні лінії

шого ми вивчали індукційну поверхню мінеральних зерен, а не їх сколи. Нижче зупинимось на основних характеристиках мінеральних зерен паласиту Омолон, які вивчені від макроскопічного до електронно-мікроскопічного рівня.

**Олівін.** Вивчено 17 прозорих зерен олівіну жовтого кольору. В переважній більшості випадків на поверхні зерен наявні включення, системи деформаційних пластинок, скульптури налипання і конденсації, а також продукти земного вивітрювання, що відзначено і в попередніх дослідженнях [3]. Цікаво зауважити, що в окремих клиноподібних пластинках деформації вперше встановлена їх трубчаста будова з подвійними стінками (рис. 1, *a*). Виникає враження, що в процесі ударного метаморфізму поверхневий шар зерна олівіну був відірваний від основної його частини і zdeформований. Оскільки клиноподібні структури деформації є лише на згинах зерен, можна допустити, що нерівномірність розподілу ударного тиску по поверхні зерна зумовила відривання поверхневих шарів і їх пластичну деформацію саме на ділянках найбільшого його навантаження.

Крім деформаційних скульптур на поверхні окремих зерен були включення кульок камаситу і трюїліту розміром до 50 мкм з гладкою поверхнею, мікронні включення складної акреційної будови, а також гексагональні пластинки невстановленого складу (рис. 1, *б*). Останні розглянемо детальніше. Такі пластинки виявлено нами раніше на поверхні зерен олівіну в хондритах Кримка і Саратов [2]. При збільшенні 1000 пластинки мають вигляд щільної присипки білого кольору. При збільшенні вище 5000 чітко видна їхня 6-кутна форма, а також закономірний характер розташування. Розмір пластинок переважно  $\leq 1$  мкм, товщина  $\leq 0,01$  мкм. Пластинчасті кристали виступають над поверхнею зерна олівіну і утворюють паралельні ряди, напрямок яких повністю ідентичний напрямку деформаційних ліній, наявних в олівіні. Таке розміщення гексагональних пластинок дає змогу припускати їх вторинне походження і кристалізацію після ударного метаморфізму в найбільш ослаблених деформацією ділянках олівіну. На жаль, через незначні розміри пластинок не встановлено їх хімічний склад ні в хондритах, ні в паласиті Омолон. Дослідження у відбитих електронах і на енергодисперсійному спектрометрі вказують на підвищений вміст заліза в пластинках порівняно з його вмістом в олівіні, тому можна припустити з великою часткою ймовірності

належність кристалів до оксиду заліза, а саме до гематиту, який утворився внаслідок вивітрювання паласиту.

Ще в ХХ ст. вказувалось [5] на наявність в олівіні трубчастих утворень невідомої природи як на відмінну ознаку олівіну в паласитах порівняно з іншими групами метеоритів, а також із земними породами. У наших дослідженнях такі включення не встановлено. Лише в одному із зерен олівіну під бінокулярним знайдено голкоподібне включення темно-коричневого кольору. За даними СЕМ-дослідження, включення, яке було попередньо виділене із зерна олівіну, це кристал олівіну, на гранях якого розміщуються плівочки метеоритного фосфату — стенфілдиту (рис. 1, *в*), і троїліту. У відбитих електронах плівочка стенфілдиту має світло-сірий колір і характеризується наявністю великої кількості мікронних і субмікронних пор. Товщина плівочки менше 1 мкм.

Відповідно до даних енергодисперсійних досліджень, олівін містить у середньому 15,3 % молекулярної частки фаялітового компонента, що відповідає вищому значенню, ніж отримано за рентгеноспектрального вивчення складу олівіну ( $\text{Fe}_{1,2,2}$ ) в аншліфах [1], тобто всередині зерен. Підвищений вміст Fe на поверхні зерен олівіну зумовлений її контактом з металевим каркасом паласиту, а також з наявністю на ній хоча і надзвичайно тонких, але продуктів вивітрювання нікелістого заліза. Таким чином, для отримання коректних даних щодо хімічного складу олівіну необхідно проводити визначення всередині зерен.

**Нікелісте залізо (Fe,Ni).** Знайдено у вигляді окремих кульок, кристалів, пластинок (окремі пластинки утворюють складне за формою переплетення), віскерсів і представлене переважно камаситом, меншою мірою тенітом і плеситом. Під електронним мікроскопом вивчено 16 зерен металу. Як і в попередніх дослідженнях [3], на їх поверхні наявні пластинки деформації, скульптури перекристалізації, а також продукти вивітрювання — ажурні скупчення субмікронних розеток гетиту і в окремих випадках мікронні кульки зернистої будови невизначеного складу. Оскільки останні розміщуються на поверхні гетиту, їх земне походження не викликає сумніву. Вперше в метеоритах нами знайдені зерна камаситу в вигляді віскерсів завдовжки 400 мкм і завширшки 16 мкм. Віскерси злегка зігнуті, а уздовж них розміщуються пластинки деформації. Утворення таких кристалів свідчить про їх швидкий нерівноважний ріст у вільному міжзерновому просторі, пересиченому парами Fe і Ni, найімовірніше в результаті впливу ударного метаморфізму на материнське тіло паласиту в космосі.

Згідно із дослідженнями хімічного складу, камасит у середньому містить (9 точок), %: 91,2 Fe; 6,82 Ni; 1,24 Co; плесит (8 точок) — 83,7 Fe; 14,92 Ni; 0,75 Co; теніт (4 точки) — 76,8 Fe; 23,1 Ni; 0,17 Co, що узгоджується з типовими характеристиками складу мінералів нікелістого заліза в паласитах.

**Юцит (FeO).** Уперше діагностований нами в паласиті Омолон у вигляді чорних блискучих під бінокулярним кульок, а також окремих тонких кірочок, які злушилися з їхньої поверхні. За результатами СЕМ-досліджень, поверхня кульок (рис. 1, *з*) має полікристалічну будову, а в монокристалах наявні лінійні деформації зсуву. Згідно з енергодисперсійними даними, поверхня кульок, а також чорні блискучі кірочки складені юцитом (99,6 % FeO і 0,4 % NiO), який є метеоритним мінералом, що утворюється або за ударного метаморфізму, або в корі плавлення метеориту [6]. Враховуючи відсутність на вивченому нами зразку паласиту кори плавлення, можна зробити висновок про ударно-метаморфічну природу зерен юциту. При цьому слід зазначити, що в попередній роботі ми знайшли аналогічні за будовою і розміром кульки камаситу [3], які є ординарним компонентом паласитів [7]. Саме цей факт і на-



**Рис. 2.** Сканувальне електронно-мікроскопічне зображення скульптури поверхні зерен троїліту, хроміту і кварцу:

*a* — скульптури тонкого поліцентричного росту гексагональних шарів на поверхні зерна троїліту; *б* — відбиток кристала хроміту зі сходинками росту, який випав з поверхні зерна троїліту; *в* — включення, а також відбитки кристалів троїліту на поверхні зерна хроміту; *г* — деформаційні смуги на поверхні зерна кварцу

явність у вивчених пробах кірочок іоциту є свідченням заміщення іоцитом периферії камаситових кульок найімовірніше внаслідок ударного метаморфізму, типові прикмети якого збереглися в металі як структури перекристалізації і деформації.

**Троїліт FeS.** Під бінокляром троїліт має жовтий колір із синьою мінливістю. Досліджено окремі кульки, поверхня яких має полікристалічну будову, зумовлену ударно-метаморфічною перекристалізацією, а також окремі уламки зерен. Поверхня грані одного із зерен характеризується наявністю тонкої скульптури поліцентричного росту троїліту (рис. 2, *a*), що є свідченням незначного пересичення мінералоутворювального середовища парами  $H_2S$ . Крім того, на поверхні зерна троїліту є відбитки кубічних кристалів хроміту (рис. 2, *б*), які кристалізувались на міжфазовій межі внаслідок самоочищення сульфідів і відповідної твердофазової дифузії елементів під час охолодження материнського тіла метеорита. Характер відбитків чітко вказує на наявність сходинок росту на гранях хроміту, як індикатора злегка нерівноважного росту кристалів. Кристалізація хроміту на міжфазових межах мінералів відзначалась нами раніше в нікелістому залізі і була віднесена до первинних скульптурних особливостей паласитів.

Хімічний склад троїліту (3 точки), %: 38,4 S; 60,3 Fe.

**Хроміт.** Під бінокляром спостерігаються чорні блискучі зерна, які на тонких сколах мають темно-бурий колір. Уперше на їх поверхні під електронним мікроскопом виявлені лінійні, полосаті та клиноподібні скульптури деформації, а також відзначаються трубчасті деформаційні утворення, аналогічні деформаціям в олівіні. На окремих гранях кристалів хроміту є численні включення кристалів троїліту розміром переважно  $\leq 5$  мкм та їх відбитки (рис. 2, *в*). Включення троїліту всередині зерен хроміту встановлені раніше під час дослідження аншліфів інших паласитів під оптичним мікроскопом [7].

Відповідно до даних енергодисперсійних досліджень у 15 точках на поверхні 7 зерен хроміт у середньому містить, %: 59,1  $Cr_2O_3$ ; 24,8 FeO; 8,11  $Al_2O_3$ ; 6,54 MgO; 0,42  $V_2O_5$ .

На відміну від олівіну і особливо нікелістого заліза, хроміт стійкіший до вивітрювання. Продукти вивітрювання на його поверхні дуже обмежені,

лусочки гідроксидів заліза мають значно менші розміри ( $\leq 0,1$  мкм), ніж в інших мінералах.

**Са-піроксен.** Відібраний під бінокуляр у вигляді уламка ( $400 \times 400$  мкм) призматичного кристала, поверхня сколу якого має пластинчасту будову. Відповідно до хімічного складу ( $\text{SiO}_2$  — 51,5 %;  $\text{MgO}$  — 15;  $\text{FeO}$  — 14,6;  $\text{CaO}$  — 12,6;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — 5,75,  $\text{K}_2\text{O}$  — 0,56 %) він належить до авгіту, тобто до мінералу, який в паласитах діагностовано вперше. Відомо, що в деяких паласитах є акцесорні кількості низькокальцієвого піроксену, розміри зерен якого не перевищують кілька мікрметрів [7]. З урахуванням відсутності індукційних граней на поверхні кристала авгіту і, відповідно, типових для космічних мінералів скульптурних елементів метеоритне походження авгіту залишається під питанням.

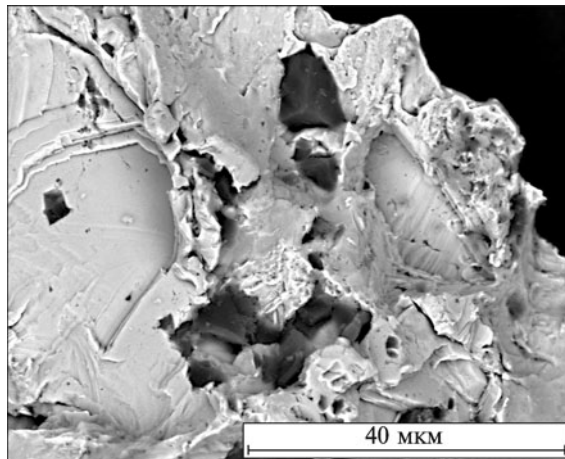
**Шрейберзит  $(\text{Fe,Ni})_3\text{P}$ .** Виявлено під бінокуляр у вигляді фрагмента кульки, жовтого кольору з металічним блиском розміром  $450 \times 250$  мкм. Згідно з хімічним складом, поверхня зерна шрейберзиту злегка окиснена в земних умовах і містить 63,2 % Fe; 25,27 — Ni; 7,35 — P; 0,52 — Co та 3,65 % O.

**Стенфілдит  $\text{Ca}_4\text{Mg}_3\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_6$ .** Крім вищеописаної кірочки фосфату на кристалі олівину були знайдені також його окремі зерна. Під бінокуляр вони матові, світло-жовтого, майже білого кольору. На поверхні грані одного з кристалів спостерігаються гексагональні включення троїліту, рівноважний ріст яких зумовлений повільним охолодженням основної частини метеорита. Згідно з енергодисперсійними замірами у 6 точках 3 зерен, стенфілдит у середньому містить 48,2 %  $\text{P}_2\text{O}_5$ ; 26,1 —  $\text{CaO}$ ; 15,9 —  $\text{MgO}$ ; 8,89 %  $\text{FeO}$ .

**Самородна мідь.** У вигляді включень розміром до 40 мкм виявлена під час електронно-мікроскопічних досліджень на поверхні зерен камаситу ( $\text{Cu}$  — 76 %;  $\text{Fe}$  — 15,4;  $\text{S}$  — 7,54;  $\text{Ni}$  — 1,03 %) та олівину ( $\text{Cu}$  — 96,4 %;  $\text{S}$  — 2,42;  $\text{Si}$  — 1,22 %).

**Кварц.** У мінеральній пробі метеорита встановлено 2 зерна кварцу, які діагностовано за хімічним складом. Одне — у вигляді типового кристала, а інше — як уламок зерна. Перше зерно віднесено до земного забруднення, а друге найімовірніше має метеоритне походження, оскільки на його поверхні є деформаційні смуги (рис. 2, з), аналогічні таким самим в олівині й хроміті паласиту. Відомо, що в земному кварці структури деформації наявні лише в зразках з метеоритних кратерів.

**Графіт.** Включення графіту вперше знайдені нами в паласиті Омолон на поверхні зерна нікелістого заліза (масова частка, %: 80,7 Fe; 18,5 Ni; 0,62 Co)



**Рис. 3.** Сканувальне електронно-мікроскопічне зображення у відбитих електронах включень графіту на поверхні зерна нікелістого заліза

у вигляді кристалів 4-кутної форми або подовжених зерен (рис. 3). У відбитих електронах видно, що включення майже чорного кольору, окремі з них мають пористу будову. Хімічний склад, %: 99,6 С; 0,4 Fe. У роботі [1] в аншліфах паласиту Омолон також були діагностовані зерна С-вмісного метеоритного мінералу — хаксоніту  $(\text{Fe}, \text{Ni}, \text{Co})_{23}\text{C}_6$ , і світлий та темний різновиди камаситу, які розрізнялися за вмістом С ( $\leq 0,6$  і  $\geq 1$  % відповідно). У тій самій роботі зроблено допущення про дифузію С з хаксоніту в метал унаслідок ударного метаморфізму. Відповідно до наших результатів, кристалізація графіту на фазовій межі нікелістого заліза зумовлена твердофазовою дифузєю С у металі внаслідок його очищення в процесі повільного охолодження материнського тіла паласиту.

Надзвичайно малі кількості графіту були знайдені раніше лише в паласиті Красноярськ [7].

Таким чином, у результаті електронно-мікроскопічних досліджень мінеральної склад паласиту Омолон поповнений графітом, іоцитом, кварцом і, можливо, авгітом. Крім графіту ці мінерали знайдені в паласитах уперше. На поверхні зерен олівіну і хроміту діагностовані невідомі раніше деформаційні скульптури у вигляді трубчастих утворень, які, найімовірніше є результатом одночасної дії крихких і пластичних деформацій на поверхневий шар мінералів унаслідок нерівномірного поширення ударного тиску в межах зерна. На гранях одного із зерен трюїліту знайдені скульптури поліцентричного росту, які є свідченням злегка нерівноважних умов росту мінералу в період його кристалізації.

На завершення слід зазначити, що повноцінне вивчення структурно-мінералогічних особливостей метеоритів неможливе без комплексного дослідження як аншліфів, так і поверхні окремих зерен, яка є не лише носієм акцесорних мінералів, що кристалізувалися на фазових межах у процесі повільного охолодження материнського тіла, а й чутливим індикатором ступеня ударно-метаморфічного перетворення космічної речовини. Під час вивчення хімічного складу поверхні окремих зерен потрібно враховувати ступінь її зміни в результаті земного вивітрювання. Наявність хоча би незначної кількості вторинних продуктів зумовлює отримання некоректних даних. Вивчення такої поверхні рівноцінне вивченню хімічного складу вивітрених земних порід, а не їх свіжих сколів.

*Автори щиро вдячні В.М. Сливінському за технічну допомогу під час проведення електронно-мікроскопічних досліджень.*

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Бондарь Ю.В.* Термическая история палласитов по данным минералого-геохимических и треновых исследований: Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. — Киев, 1994. — 22 с.
2. *Семенов В.П., Гирич А.Л.* Хондрит Саратов (L4): 1. Скульптура поверхности хондр и некоторые особенности их минералогии // Минерал. журн. — 1998. — 20, № 2. — С. 19—33.
3. *Семенов В.П., Квасниця І.В., Алексеева О.І., Ширінбекова С.Н.* Особливості скульптури поверхні зерен мінералів у паласитах // Зап. Укр. мінерал. тов-ва. — 2008. — 5. — С. 68—74.
4. *Семенов В.П., Тертычная Б.В., Клейменов А.В.* Скульптура поверхности частиц никелістого железа в хондритах // Метеоритика. — 1987. — 46. — С. 73—80.
5. *Чирвинский П.Н.* Палласиты. — М.: Недра, — 1967. — 287 с.

***Скульптура поверхні та хімічний склад мінеральних зерен паласиту Омолон***

---

6. Юдин И.А., Коломенский В.Д. Минералогия метеоритов. — Свердловск: Урал. науч. центр. — 1987. — 200 с.
7. Buseck P.R. Pallasite meteorites — mineralogy, petrology and geochemistry // Geochim. Cosmochim. A. — 1977. — **41**. — P. 711—740.
8. Wlotzka F. Meteoritical Bulletin, № 72 // Meteoritics. — 1992. — **27**. — P. 109—117.

Надійшла 14.04.2009

*V.P. Semenenko, T.N. Gorovenko*

**SCULPTURE OF A SURFACE AND CHEMICAL COMPOSITION  
OF MINERAL GRAINS OF THE PALLASITE OMOLON**

The data of scanning electron microscope and energy dispersive researches of the surface sculpture and chemical composition of mineral grains of the pallasite Omolon are given. Graphite, wüstite, quartz, and probably augite as well as a new kind of sculpture of deformation are originally discovered. The sculpture features of grain surfaces indicate to the slightly nonequilibrium growth of minerals and to the multistage shock-metamorphic history of the pallasite.