

УДК 523.681

## СКУЛЬПТУРА ПОВЕРХНІ ТА ХІМІЧНИЙ СКЛАД МІНЕРАЛЬНИХ ЗЕРЕН ПАЛАСИТУ *БРАГІН*

Т. Горовенко

ДУ “Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України”  
03680 м. Київ-142, просп. акад. Палладіна, 34а  
E-mail: cosmin@i.ua

Наведено результати електронно-мікроскопічних та хімічних досліджень поверхні мінеральних зерен паласиту *Брагін*. Підтверджено домінування вторинних скульптур над первинними на поверхні зерен мінералів. Уперше знайдено бравоїт, який утворився в паласиті внаслідок звітрювання нікелістого заліза і троїліту.

*Ключові слова:* метеорит, паласит, скульптура поверхні, бравоїт, хімічний склад мінералів, електронна мікроскопія.

Паласит *Брагін* класифікують як представника головної, тобто найпоширенішої групи паласитів РМГ. Цей метеорит знайдено у Брагінському р-ні Гомельської обл. Білорусі. Оскільки з 1807 по 1968 рр. у цьому районі знайдено дев'ять екземплярів метеорита, то падіння паласиту *Брагін* вважають метеоритним дощем. Загальна маса взірців – близько 800 кг, збереглося 724 кг [5].

Згідно зі структурно-мінералогічними характеристиками [1, 2, 3, 5, 7], у ньому є головно олівін і нікелісте залізо (камасит, теніт, плесит), у вигляді аксесоріїв – пентландит, троїліт, хроміт і фосфіди заліза. Наявні в метеориті ознаки ударного метаморфізму свідчать про неодноразові зіткнення материнського тіла паласиту з іншими космічними тілами. Наприклад, з'ясовано, що два інтенсивні удари супроводжувались підвищенням ударного тиску до  $(250\text{--}450)\times 10^2$  МПа і температури в основній масі метеорита до 400–4 500 °С, а в окремих ділянках до 10 000 °С. Подальші низькотемпературні удари в межах  $(80\text{--}130)\times 10^2$  МПа зумовили лише незначні зміни в будові метеорита. Трековий вік паласиту *Брагін* – 4,3–4,2 млрд років. За ступенем ударно-метаморфічного перетворення речовини паласит належить до помірно метаморфізованих [1].

Електронно-мікроскопічні дослідження поверхні зерен олівіну, кристалів магнетиту, камаситу та шрейберзиту в паласиті *Брагін* [2, 3, 8] свідчать про наявність первинних і вторинних скульптурних елементів, з яких найбільше поширені вторинні. Цей факт доводить значний вплив ударного метаморфізму на первинні структурно-мінералогічні характеристики паласиту *Брагін*.

Нижче наведено результати детальних скульптурних і хімічних досліджень зерен олівіну, нікелістого заліза, хроміту, троїліту, пентландиту, бравоїту, шрейберзиту та самородної міді, відібраних із мінеральної фракції паласиту *Брагін*. Більшість зерен представлена асоціаціями двох та більше мінералів, що дає змогу виявити фазові взаємовідношення та характер розподілу елементів на міжфазових межах. Дослідження скульптури поверхні та хімічного складу зерен виконано за допомогою сканувального

електронного мікроскопа (СЕМ) марки JEOL JSM-6490LV, обладнаного енергодисперсійним спектрометром Penta FETx3 Oxford Instruments. Зазначимо, що в переважній більшості випадків вивчали індукційну поверхню мінеральних зерен, а не їхні відколи.

Мінеральні зерна паласиту *Брагін*, відібрані з силікатної фракції паласиту (до роздрібнення вона заповнювала комірки металевого каркаса), вивчено макроскопічно та за допомогою електронного мікроскопа.

Результати дослідження дають підстави виділити такі особливості скульптури поверхні та хімічного складу мінеральних зерен паласиту *Брагін*.

**Олівін.** Зерна олівіну мають розмір від 50 мкм до 1,3 мм. Трапляються зерна від прозорих безбарвних до майже непрозорих бурих, однак переважають блискучі прозорі зерна ясно-жовтого кольору. Більшість зерен має одну чи декілька плоских граней з одного боку в поєднанні з уламковими формами, а іноді з округлими поверхнями. Наявність граней свідчить про вільний ріст кристалів олівіну в міжзерновому просторі. Округла форма характерна для дрібних зерен, більшість із яких є у вигляді включень у пентландиті й троїліті. Деякі великі зерна олівіну з плоскими гранями містять усередині та на поверхні кульки діаметром від 10 до 200 мкм, складені троїлітом, нікелістим залізом, їхніми зростками.

Частина зерен олівіну має індукційні поверхні, на яких збереглися сліди тісного контакту з ударним розплавом троїліту або нікелістого заліза у вигляді плівочок троїліту й гідрооксидів заліза. На поверхні одного з таких зерен знайдено тоненькі плівочки троїліту, пентландиту та нікелістого заліза. Відповідно до даних енергодисперсійних досліджень, вивчені зерна олівіну вміщують у середньому 11,6 мол. % Fe, що, згідно з даними П. Чирвінського [5], свідчить про температуру його кристалізації в межах 1 450–1 500 °С.

У двох прозорих зернах олівіну зафіксовано тоненькі жилки чорного кольору, представлені фосфідами заліза. Також у двох аналізах олівіну простежено підвищений вміст фосфору (до 3,9 мас. %  $P_2O_5$ ), що свідчить про наявність фосфористого олівіну. Фосфористі зони в олівіні паласиту *Брагін* підтверджені також попередніми дослідженнями [7]. Відповідно до даних енергодисперсійних досліджень, у 58 точках на поверхні 23 зерен олівін вміщує в середньому, мас. %: 47,4 MgO, 41,3 SiO<sub>2</sub>, 11,1 FeO, 0,15 MnO, 0,14 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

**Нікелісте залізо** знайдено в силікатній фракції паласиту в невеликій кількості у вигляді тоненьких плівочок на поверхні зерен олівіну, кульок, включень на поверхні зерен троїліту. Воно представлене тенітом, плеситом, в окремих випадках камаситом. На поверхні одного з зерен олівіну знайдено теніт-плеситову кульку розміром > 200 мкм, вміст Ni у якій коливається від 20,5 до 62,5 мас. %. Згідно з дослідженнями хімічного складу, камасит вміщує в середньому (сім точок, мас. %) 94,10 Fe, 4,52 Ni, 1,34 S; а теніт (16 точок) – 61,30 Fe, 38,60 Ni, 0,15 Co.

Майже повна відсутність у дрібній силікатній фракції більше поширеного в паласитах камаситу, найімовірніше, пов'язана з процесами земного звітрявання, унаслідок яких камасит перетворився на пентландит. Це припущення підтверджене наявністю у великій кількості зерен пентландиту.

З сульфідних мінералів у паласиті *Брагін* знайдено троїліт FeS, пентландит (Fe,Ni)<sub>9</sub>S<sub>8</sub> та бравоїт (Fe,Ni,Co)S<sub>2</sub>.

**Троїліт** відшукано в невеликій кількості у вигляді окремих зерен, тоненьких плівочок на поверхні зерен олівіну та кульок діаметром близько 10 мкм усередині й на поверхні прозорих зерен олівіну. Наявність плівочок може свідчити про тісний контакт зерен

олівіну з троїлітом і про розтікання у міжзерновому просторі розплаву троїліту, утворення якого зумовлене ударним метаморфізмом. Оскільки троїліт належить до найбільш легкоплавких метеоритних мінералів (950–980 °C), то його розплав з легкістю заповнює міжзерновий простір і дуже дрібні тріщинки в метеоритах [5]. На поверхні одного зерна троїліту знайдено кристал темно-бурого кольору зі сходинками росту на гранях (рис. 1). Цікавою особливістю є те, що в паласиті *Брагін* троїліт асоціює з пентландитом, а це свідчить про часткове заміщення троїліту пентландитом унаслідок процесів земного звітрювання.

Визначення хімічного складу троїліту свідчить, що в середньому (15 точок) він вміщує, мас. %: 60,90 Fe, 37,90 S, 0,67 Co, 0,43 Ni, 0,06 Cr.

**Пентландит** належить до досить поширених мінералів дрібної фракції паласиту. Найімовірніше, він має вторинне походження й утворився внаслідок земного звітрювання нікелістого заліза і троїліту. Згідно з [7, 10], процеси земного звітрювання зумовлюють осадження гідроксидів заліза з FeNi-фази з подальшою взаємодією Ni як більш халькофільного елемента й утворенням пентландиту.

Знайдено окремі зерна пентландиту, плівочки на поверхні зерен олівіну, а також зростки з троїлітом. На поверхні одного зерна пентландиту діагностовано петельчасті вторинні скульптурні елементи (рис. 2). Хімічний склад більшості зерен пентландиту має підвищений вміст Ni (до 66,10 мас. %) і Co (іноді до 16,10 мас. %), що може бути результатом подальших процесів земного звітрювання, унаслідок яких пентландит перетворюється у бравоїт (Fe,Ni,Co)S<sub>2</sub> [10]. Вторинний пентландит з високим вмістом Ni та Co також зафіксовано в паласитах *Eagle Station* та *Красноярськ* [1].

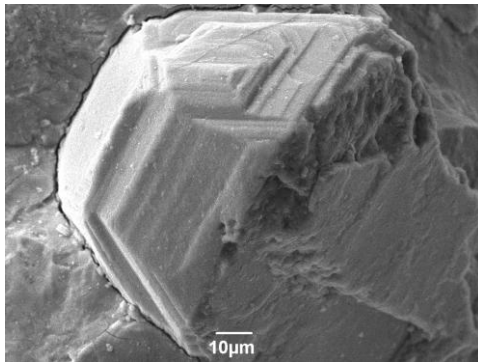


Рис. 1. Сканувальне електронно-мікроскопічне (SEM) зображення гексагонального кристалу зі сходинками росту (відбиті електрони).

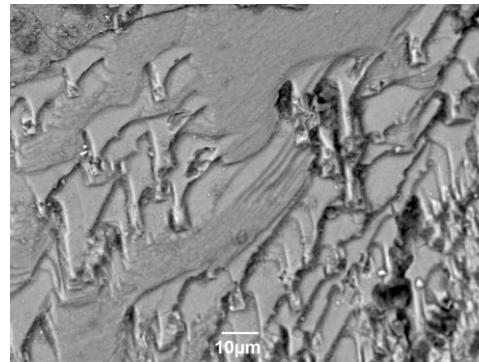


Рис. 2. СЕМ-зображення петельчастої скульптури на поверхні зерна пентландиту (вторинні електрони).

**Шрейберзит** (Fe,Ni)<sub>3</sub>P знайдено у вигляді кристала (Ni до 56,10 мас. %) та включень неправильної форми на поверхні зерен пентландиту. Грані кристала шрейберзиту мають сходинки росту, що свідчить про нерівноважні умови його кристалізації (рис. 3). Згідно з енергодисперсійними даними, мінерал у середньому містить, мас. %: 56,50 Fe, 26,30 Ni, 16,30 P, 0,94 S.

Також у двох прозорих зернах олівіну зафіксовано тонькі чорні жилки завтовшки близько 5 мкм (рис. 4). Хімічний склад свідчить про їхню належність до фосфідів заліза з високим вмістом фосфору (8,13–22,8 мас. %) та низьким вмістом нікелю ( $\leq 1,05$  мас. %). Така особливість хімічного складу фосфідів може доводити їхню належність до Ni-

збідненого різновиду Fe-барингериту, який раніше знайдено лише в місячному метеориті *Yamato-793274* [6]. Досить високий вміст Si (від 6,08 до 16,51 мас. %) у хімічному складі чорних жилок може бути пов'язаний або з забрудненням олівіном, або з належністю їх до фосфосиліцидів. Нині це питання відкрите і потребує додаткових досліджень.

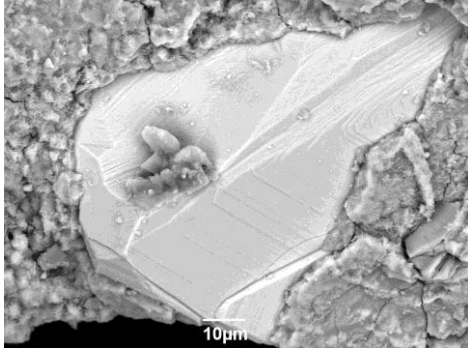


Рис. 3. СЕМ-зображення включення кристала шрейберзиту в пентландиті (вторинні електрони).

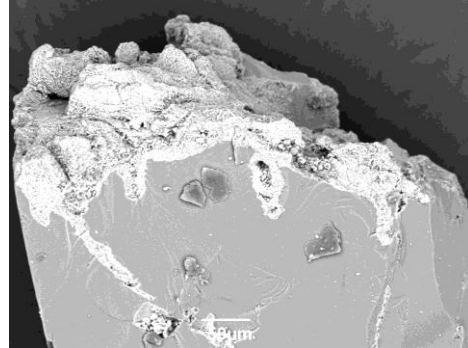


Рис. 4. СЕМ-зображення чорних жилок фосфідів заліза (біле) в прозорому кристалі олівіну (вторинні електрони).

**Хроміт.** Серед зерен дрібної фракції паласиту *Брагін* хроміт знайдено в досить великій кількості, що не є типовим для паласитів. У літературних джерелах [5, 9] зазначено, що для паласитів характерний вміст хроміту до 1 %. Згідно з дослідженнями хімічного складу, хроміт уміщує в середньому (21 точка, мас. %) 68,70  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , 22,40 FeO, 6,68 MgO, 0,93  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 0,71 MnO, 0,54  $\text{V}_2\text{O}_5$ , 0,08  $\text{TiO}_2$ . Особливість хімічного складу хроміту свідчить про його високотемпературне утворення.

Усі знайдені зерна хроміту мають правильну кристалографічну форму. На поверхні одного кристала розміром  $0,35 \times 0,30$  мм з плоскими гранями зафіксовано лінійні та клиноподібні деформаційні системи (рис. 5), які, найімовірніше, пов'язані з процесами ударного метаморфізму. На поверхні іншого кристала виявлено трубчасті скульптури, подібні до яких трапляються на поверхні кристалів хроміту в паласиті *Омолон* [4].

**Самородну мідь** відшукали у вигляді окремого зерна розміром близько 0,2 мм, поверхня якого має полікристалічну будову та сходинки росту, а також пори розміром від 0,2 до 20 мкм (рис. 6). Середній хімічний склад зерна міді відповідає (вісім точок, мас. %) 99,50 Cu, 0,20 Al, 0,18 Fe, 0,05 Co, 0,04 Mg. Самородна мідь раніше діагностована лише у вигляді включень на поверхні зерен металу в паласиті *Омолон* [4] та олівіну в паласиті *Брагін* [2].

Отже, скульптурні та хімічні дослідження поверхні мінеральних зерен паласиту *Брагін* підтверджують попередні дані [2, 3, 8] про наявність на їхніх індукційних поверхнях переважно вторинних і в значно меншій кількості первинних скульптурних елементів. Первинні скульптурні елементи сформувалися, найімовірніше, внаслідок повільного охолодження материнського тіла паласиту. Сходинки росту, що простежуються на поверхні кристалів шрейберзиту, камаситу, трюїліту та самородної міді, відображають умови росту у мінералоутворювальному середовищі – їхнє утворення зумовлене кристалізацією за умов злегка пересиченого середовища. Формування ж окремих граней у вигляді полігональних поверхонь та зародків граней в округлих зернах олівіну свідчить про повільне зниження температури у мінералоутворювальному середовищі, хоча швид-

кість зниження є недостатньою для того, щоб утворилися класичні грані кристалів олівіну. Вторинні скульптурні елементи утворилися внаслідок ударного метаморфізму (тріщинуватість, лінійні, пластинчасті, клиноподібні скульптури та трубочки на поверхні хроміту, а також кульки, плівочки й жилки) в космосі та екзогенних процесів на Землі (продукти звітрювання).

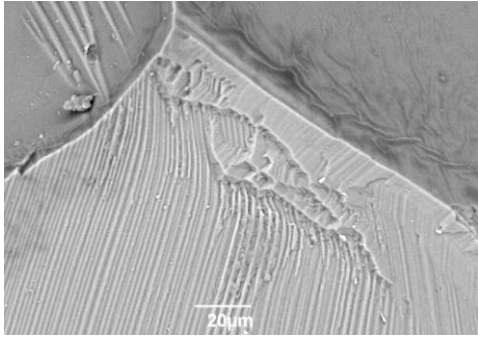


Рис. 5. СЕМ-зображення лінійних та клиноподібних деформаційних систем на гранях кристала хроміту (вторинні електрони).

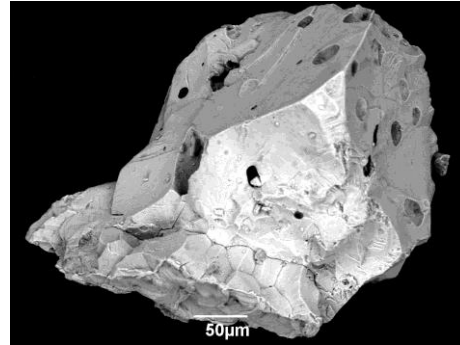


Рис. 6. СЕМ-зображення окремого зерна самородної міді (вторинні електрони).

Серед мінералів паласитів уперше знайдено бравойт  $(\text{Fe,Ni,Co})\text{S}_2$ . Відповідно до високого вмісту Co в пентландиті та бравойті, цей мінерал, найімовірніше, є результатом процесів земного звітрювання нікелістого заліза і трюліту, які частково чи повністю заміщені пентландитом з подальшим перетворенням на бравойт за земних умов.

Автор щиро вдячний В. Сливінському за технічну допомогу під час проведення електронно-мікроскопічних досліджень.

1. Бондарь Ю. В. Термическая история палласитов по данным минералого-геохимических и трековых исследований : Автореф. дисс. ... канд. геол. наук / Ю. В. Бондарь. – Киев, 1994. – 22 с.
2. Особливості скульптури поверхні зерен мінералів у паласитах / В. П. Семененко, І. В. Квасниця, О. І. Алексєєва, С. Н. Ширінбекова // Зап. Укр. мінерал. т-ва. – 2008. – Т. 5. – С. 68–74.
3. Семененко В. П. Природа кристалів магнетиту в паласиті Брагін / В. П. Семененко, О. І. Алексєєва // Зап. Укр. мінерал. т-ва. – 2006. – Т. 3. – С. 157–160.
4. Семененко В. П. Скульптура поверхні та хімічний склад мінеральних зерен паласиту Омолон / В. П. Семененко, Т. М. Горovenко // Зап. Укр. мінерал. т-ва. – 2009. – Т. 6. – С. 63–69.
5. Чирвинский П. Н. Палласиты, их минералого-химический состав, положение в ряду других метеоритов / П. Н. Чирвинский. – М. : Недра, 1967. – 287 с.
6. Brandstätter F. The discovery of iron barringerite in lunar meteorite Y-793274 / F. Brandstätter, C. Koeberl, G. Kurat // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1991. – Vol. 55. – P. 1173–1174.
7. Buseck P. R. Pallasite meteorites – mineralogy, petrology and geochemistry / P. R. Buseck // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1977. – Vol. 41. – P. 711–740.

8. Kvasnytsya I. V. SEM-study of a mineral grain surface in pallasites / I. V. Kvasnytsya, V. P. Semenenko // Meteorit. Planet. Sci. – 2003. – Vol. 38. – P. A10.
9. Mason B. The pallasites / B. Mason // Amer. Museum Novitates. – 1963. – N 2163. – 19 p.
10. Ramdohr P. The opaque minerals in stony meteorites / P. Ramdohr. – Berlin : Akad. Verl., 1973. – 245 p.

**SCULPTURE OF THE SURFACE AND CHEMICAL COMPOSITION  
OF PALASSITE *BRAGIN* MINERAL GRAINS**

**T. Gorovenko**

*SI “Institute of Environmental Geochemistry of NASU”  
Acad. Palladin Av. 34a, UA – 03680 Kyiv, Ukraine  
E-mail: cosmin@i.ua*

The results of electron-microscopic and chemical studies of mineral grains surface from the palassite *Bragin* are given. Dominance of secondary sculptures over primary ones on the mineral grains surface has been confirmed. Bravoite has been found out for the first time; it has been formed in the palassite in consequence of nickel-iron and troilite weathering.

*Key words:* meteorite, palassite, surface sculpture, bravoite, chemical composition of minerals, electronic microscopy.

**СКУЛЬПТУРА ПОВЕРХНОСТИ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ  
МИНЕРАЛЬНЫХ ЗЕРЕН ПАЛАССИТА *БРАГИН***

**Т. Горовенко**

*ГУ “Институт геохимии окружающей среды НАН Украины”  
03680 г. Киев-142, просп. акад. Палладина, 34а  
E-mail: cosmin@i.ua*

Приведено результати електронно-мікроскопічних і хімічних досліджень поверхності мінеральних зерен палассита *Брагин*. Підтверджено домінування вторичних скульптур над первичними на поверхності зерен мінералів. Вперше знайдено бравойт, який утворився в паласситі в результаті виветривання нікелістого заліза і троїліта.

*Ключевые слова:* метеорит, палассит, скульптура поверхності, бравойт, хімічний склад мінералів, електронна мікроскопія.

Стаття надійшла до редколегії 11.03.2012

Прийнята до друку 29.05.2012