

ОСОБЛИВОСТІ СКУЛЬПТУРИ ПОВЕРХНІ ЗЕРЕН МІНЕРАЛІВ У ПАЛАСИТАХ

Наведено результати растрових електронно-мікроскопічних досліджень скульптури поверхні зерен мінералів із паласитів. Показано, що тонкі скульптурні особливості на поверхні зерен є чутливим індикатором фізико-хімічних умов утворення та еволюції паласитів у космосі й на Землі.

Електронно-мікроскопічні дослідження кам'яних метеоритів – хондритів [4, 5, 10, 11, 18] та місячних порід [16] показали, що поверхня мінеральних зерен є досить чутливим індикатором фізико-хімічних умов їх виникнення та еволюції в космосі і на Землі. Особливо це стосується нікелістого заліза хондритів, яке завдяки своїм пластичним властивостям зберегло доагломераційну монолітність зерен, а їх поверхня – сліди фазових перетворень та взаємодії з навколишнім середовищем у широкому діапазоні температур. На поверхні зерен металу наявні різноманітні скульптурні елементи, які за умовами утворення класифіковано на первинні та вторинні [6, 10, 18]. Перші з них – це скульптурні елементи, що виникли під час кристалізації мінералів. Їх особливості зумовлені фізико-хімічними властивостями мінералу і *PT*-умовами мінералоутворювального середовища. До других належать елементи, що формуються в період існування мінералу в газопиловій туманності, в материнському тілі метеорита, а також після падіння метеорита на Землю. Фактично вони відображають еволюцію мінералів унаслідок зміни фізико-хімічних умов довкілля.

Метою роботи було дослідження морфологічних особливостей мінералів залізо-кам'яних метеоритів – паласитів, які, на відміну від хондритів, пройшли планетний період диференціації метал-силікатної речовини і повільного охолодження від високих температур, що зумовило знищення всіх слідів доакреційних процесів. Відповідно до традиційних уявлень [9, 12, 17], утворення паласитів включає такі основні етапи: а) формування материнського тіла хондритового складу; б) диференціацію його на металеве ядро і силікатну оболонку; в) вторгнення роз-плаву нікелістого заліза в олівінову оболонку на межі метал-силікат унаслідок тектонічної діяльності; г) затвердіння металу; д) метаморфізм; е) дроблення материнського тіла в результаті співударів у космосі з іншими тілами.

У зв'язку з наявністю високотемпературного періоду в розвитку паласитів і, відповідно, з відсутністю доа-

креційних морфологічних особливостей мінеральних зерен електронно-мікроскопічні дослідження скульптури їх поверхні є досить обмеженими [2, 15]. Більш поширені лише результати макроскопічного та оптичного дослідження зерен олівину із паласитів [7, 9], які показали, що більшість зерен мають округлу або фрагментарну форму, а також гладку поверхню.

У попередніх публікаціях [2, 15] ми акцентували увагу на перспективності електронно-мікроскопічних досліджень тонких морфологічних особливостей мінералів у паласитах для виявлення умов їх космічної і земної еволюції. Крім того, було показано, що тонкі дослідження паласитів допомагають краще зрозуміти природу мінералоутворення в примітивних метеоритах – вуглистих хондритах. Так, електронно-мікроскопічне вивчення знайдених на поверхні зерен олівину із паласиту Брагін мікрочастин магнетиту [2, 15], ідентичних хондритовим (C1) [14, 19], вказує на можливість їх утворення не лише в результаті водних процесів на материнських тілах вуглистих хондритів на ранніх етапах розвитку протопланетної туманності [13, 14, 19], а й під час вивітрювання у земних умовах [2].

Зразки паласитів Брагін, Омолон, Красноярськ та Мар'ялахті були люб'язно надані для дослідження Комітетом по метеоритах НАН України. В кожному з паласитів вивчено 40–50 зерен олівину, 30–35 зерен нікелістого заліза та окремі зерна троїліту, шрейберзиту й акцесорних мінералів – хроміту, магнетиту та самородної міді. Морфологічні дослідження включали такі етапи: 1) відбір під біноклем зерен, поверхня яких мала рельєф, а також окремих кристалів; 2) растрові електронно-мікроскопічні дослідження поверхні зерен та кристалів (растрові електронні мікроскопи PEM-100у та GEOL JSM-6490 LV); 3) діагностику якісного хімічного складу акцесорних мінералів на електронному мікроскопі JSM-840A, обладнаному енергодисперсійним спектрометром (EDS).

Серед вивчених зерен олівину виділяються зерна неправильної та округлої форми, їх уламки, рідко трапляються уламки кристалів, а серед зерен нікелістого заліза переважають утворення неправильної форми та кульки, інколи пластинчасті зерна. Всі знайдені зерна хроміту мають правильну кристалічну форму. В результаті макроскопічних досліджень установлені такі типи поверхонь на зернах олівину та нікелістого заліза: 1) гладкі; 2) ребристі; 3) тонкозернисті. При цьому слід відзначити, що скульптурні особливості мінеральних зерен збереглися лише на тих ділянках поверхні, які не були в тісному контакті з оточуючими мінералами (рис. 1, а). В усіх інших випадках поверхня зерен є гладкою. Деякі округлі зерна олівину характеризуються наявністю окремих зародків граней та граней у вигляді полігональних поверхонь. За формою та характером розміщення вони повністю відповідають зародкам граней, які спостерігались під час макроскопічного дослідження морфології зерен олівину в паласитах [7, 9].

В результаті електронно-мікроскопічних досліджень поверхні зерен олівину і нікелістого заліза із паласитів діагностовані такі скульптурні елементи.

1. Включення кристалів. На поверхні металевих зерен із паласиту Омолон знайдені численні відбитки кубічних кристалів (рис. 1, б), які утворились унаслідок випадіння включень під час підготовки зразків для дослідження. Згідно з їхньою формою, з поверхні металу випали кристали хроміту. Це підтверджується також знахідками в мінеральній фракції паласиту окремих добре розвинутих кристалів хроміту розміром менше за 250 мкм, що повністю збігається з розмірами відбитків на поверхні зерен металу. Деякі грані кристалів ускладнені сходинками росту.

На поверхні зерен олівину з паласиту Брагін спостерігали лише включення округлих зерен самородної міді та ромбоподібних зерен природного сплаву Cu-Ni-Zn.

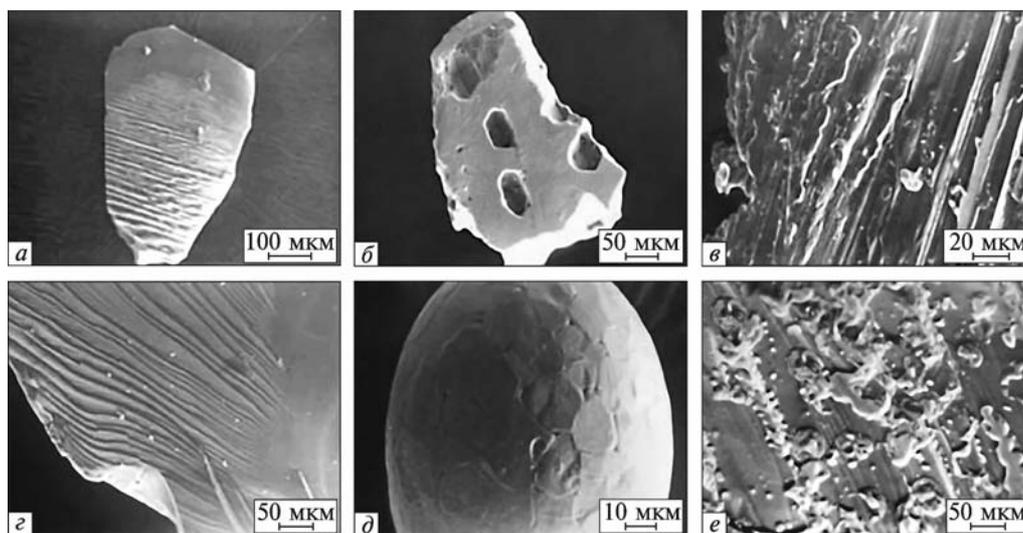


Рис. 1. Растрове електронно-мікроскопічне зображення скульптури поверхні зерен мінералів із паласитів:

а – пластинчаста будова поверхні зерна олівину, яка не була в тісному контакті з нікелістим залізом, паласит Омолон; б – відбитки включень кристалів хроміту, які випали з поверхні зерна нікелістого заліза в процесі підготовки зразків до досліджень, паласит Омолон; в – деформаційні пластинки на поверхні зерна металу із паласиту Омолон; г – система клиноподібних деформаційних пластинок, розміщених на увігнутій поверхні зерна олівину із паласиту Брагін; д – полікристалічна будова поверхні металеві кульки із паласиту Омолон, окремі монокристали покриті системою деформаційних ліній; е – бризки розплаву на поверхні зерна олівину, яка покрита деформаційними лініями, паласит Брагін

2. Пори на поверхні зерен металу в паласитах Омолон і Красноярськ. За формою і розміром виділено два типи: мало поширені округлі зерна розміром менше 5 мкм, утворюють невеликі скупчення на окремих ділянках; неправильні за формою зерна розміром понад 10 мкм мають корозійний характер. За морфологічними особливостями пори повністю ідентичні з порами, що досить поширені на поверхні зерен металу з хондритів [6, 18].

3. Скульптури деформації. У вигляді лінійних, пластинчастих (рис. 1, в), клиноподібних субпаралельних (рис. 1, г) або складніших систем вони досить широко розвинуті на поверхні зерен олівину із паласитів Омолон, Брагін, Мар'ялахті, Красноярськ та зерен металу із паласитів Омолон та Красноярськ. Скульптур деформації більше на поверхні олівінових зерен, ніж металевих. Залежно від форми і рельєфу зерна скульптури пластичної деформації змінюються від паралельних пластинок на плоских поверхнях до клиноподібних і складніших деформаційних утворень на увігнутих ділянках зерна. Деформаційні пластинки окремих зерен нікелістого заліза з паласитів Омолон і Красноярськ ускладнені скупченнями корозійних пор, що також спостерігали раніше на поверхні металу ударнометаморфізованих хондритів [6, 18].

4. Скульптури перекристалізації, а саме полікристалічна будова поверхні кульок нікелістого заліза із паласиту Омолон (рис. 1, д) та монокристалічна будова поверхні кульок олівину із паласиту Мар'ялахті. У першому випадку монокристали на гладкій поверхні кульок нікелістого заліза мають полігональну форму, що зумовлено тісним контактом металу з олівіном у процесі його рекристалізації. У другому – монокристали олівину характеризуються добре розвинутими кристалічними гранями, що пов'язано з їх вільним ростом на поверхні зерна олівину, яка не була в тісному контакті з оточуючими мінералами. Крім того, монокристали камаситу та олівину ускладнені пластинками деформації.

5. Скульптури плавлення і конденсації – налипли поодинокі кульки, бризки розплаву (рис. 1, е) та їх потоки, а також конденсаційні утворення (рис. 2, а). Вони спостерігаються здебільшого на поверхні зерен олівину із паласиту Брагін, значно в меншій кількості – із паласиту Омолон. Розмір кульок переважно менший за 10 мкм. Щільність кульок на поверхні зерен олівину змінюється в широких межах: від поодиноких до переважно щільних утворень. Бризки розплаву розміром до 500 мкм мають амебоподібну форму, що вказує на злиття менших за розміром бризок: на відміну від налиплих кульок, вони характеризуються вищою змочуваністю з поверхнею зерна олівину. Здебільшого кульки та бризки розплаву розміщені на деформаційних пластинках олівину (див. рис. 1, е; 2, б). До цієї групи скульптур належать також бризки розплаву металу та конденсаційні мікрокристалики й кульки на поверхні зерен олівину із паласиту Брагін, особливості яких та умови утворення детально розглянуті нами раніше [2].

6. Гідроксиди заліза на поверхні зерен олівину із паласитів Омолон, Брагін та на металевих зернах із паласиту Красноярськ, які відрізняються між собою характером розвитку та морфологією утворень. На поверхні олівину вони розвинуті у вигляді плям неправильної форми (рис. 2, в), суцільних або пористих плівок, інколи з характерною прямокутною окремистю на периферії плівок (рис. 2, г). На поверхні зерен металу наявні гідроксидні кульки закритого або відкритого типу (рис. 2, д) з чітко видимою пластинчастою розкристалізацією стінок і дна порожніх кульок, а також розетки тонких пластинок, будова яких ідентична типовим гідроксидним (акаганейтовим) утворенням на поверхні металу із багатьох хондритів [3] та атакситу Чінге [8].

7. Продукти земного забруднення. Найцікавішим серед них є шароподібне пустотіле утворення (рис. 2, е), яке знайдено в силікатній фракції паласиту Омолон. Форма його злегка деформована, розмір 300 мкм, поверхня характеризується стільниковою скульптурою. Енергодисперсійні спектрометричні дослідження вказують на вуглецевий склад поверхні і наявність мікронних зерен польового шпату (ортоклазу та альбіту) в стільниках. Припущення про біологічне походження цього об'єкта внаслідок земного забруднення паласиту було підтверджено ботаніками із Національного музею природознавства Франції, які діагностували його як типову пустотілу спору. Ці дані засвідчують легкість забруднення космічної речовини земною органікою. Електронно-мікроскопічні дослідження показали, що спора є фактично біологічним сепаратором мінеральної компоненти, оскільки вибірково адсорбувала в свої комірки мікрозерна тільки польового шпату.

Аналіз отриманих результатів дає змогу класифікувати зазначені скульптурні елементи на поверхні мінеральних зерен із паласитів на первинні і вторинні. До первинних належать кристали хроміту, окремі грані або їх зародки на зернах олівину, включення мінералів на поверхні зерен олівину і металу, а та кож, можливо, й окремі мікронні і субмікронні пори першого типу на металі. Первинні скульптурні елементи сформувались, найімовірніше, під час самоочищення металу та олівину в процесі твердофазової дифузії та, можливо, виділення газової фази з металу внаслідок повільного охолодження матеріального тіла паласиту. Сходінки росту, що спостерігаються на поверхні кристалів хроміту, відображають умови росту в мінералоутворювальному середовищі – кристалізація у злегка пересиченому середовищі. Формування ж окремих граней у вигляді полігональних поверхонь та зародків граней в округлих зернах олівину свідчить про повільне падіння температури у мінералоутворювальному середовищі, хоча швидкість падіння є недостатньою для того, щоб утворилися класичні грані кристалів олівину.

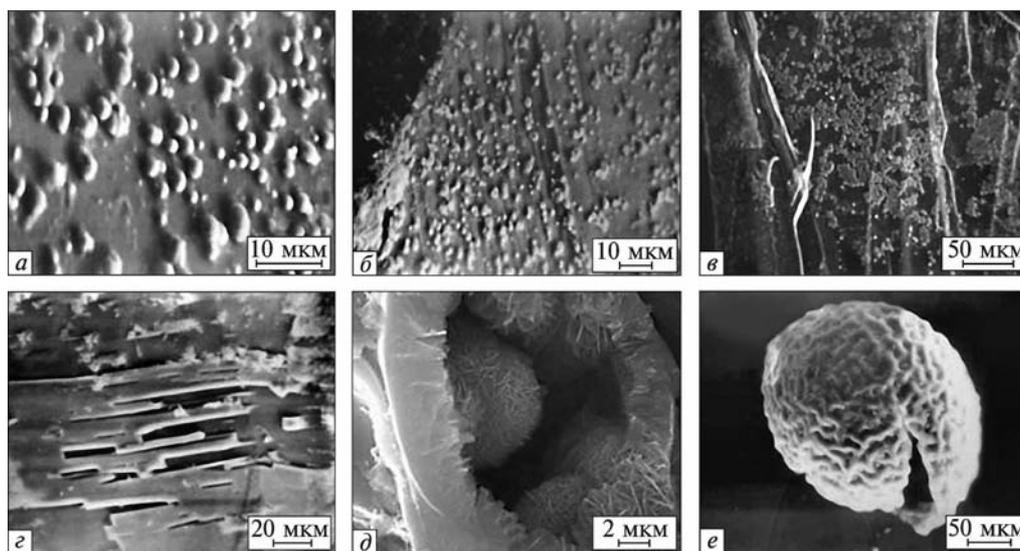


Рис. 2. Растрове електронно-мікроскопічне зображення вторинної скульптури поверхні мінеральних зерен із паласитів:

а – конденсаційні кульки, які налипли на поверхню зерна олівіну із паласиту Брагін; б – численні конденсаційні кульки, що рівномірно розміщуються на деформованій поверхні зерна олівіну із паласиту Брагін; в – ажурні утворення гідроксидів заліза на поверхні зерна олівіну із паласиту Брагін; г – плівкові продукти вивітрювання з пластинчастою окремистію на поверхні зерна олівіну із паласиту Омолон; д – відкритий тип кульок гідроксидів заліза з пластинчастою розкристалізацією стінок і дна, які розміщуються на поверхні зерна металу, паласит Красноярськ; е – стільникова скульптура поверхні спори, знайдена в силікатній фракції паласиту Омолон

До вторинних належать скульптури деформації (лінійні, пластинчасті, клиноподібні та складніші), нагрівання (полікристалічна будова поверхні зерен олівіну і металу), плавлення (бризки і потоки розплаву на зернах олівіну), конденсації (налиплі кульки, частина з яких розкристалізована) та корозії (корозійні пори). Як було вказано нами у статті [2], наявність бризок і кульок на деформованій поверхні зерен олівіну із паласитів є однозначним свідченням їх ударнометаморфічної природи. У зазначеній публікації детально розглянуто механізм утворення конденсаційних продуктів. Крім того, ударнометаморфічне походження вторинних скульптур підтверджується їх подібністю з будовою поверхні зерен у хондритах, для яких була встановлена пряма залежність між кількістю вторинних скульптурних елементів і ступенем ударнометаморфічного перетворення хондритів [6, 18]. До вторинних скульптур належать також продукти земного вивітрювання, кількість яких у паласитах пов'язана з умовами їх знаходження і збереження на Землі.

Якщо порівняти наявність і характер розвитку скульптурних елементів на поверхні зерен олівіну і нікелістого заліза з паласитів, то можна відзначити такі відмінності: 1) грані або їх зародки наявні здебільшого на зернах олівіну; 2) різний мінеральний склад включень; на зернах олівіну спостерігаються включення самородної міді й сплаву Cu-Ni-Zn; включення кристалів хроміту характерні лише для поверхні зерен металу, що зумовлено виходом хрому із кристалічної ґратки нікелістого заліза і подальшою кристалізацією хрому на міжфазовій межі в процесі повільного охолодження материнського тіла; ці дані є важливим свідченням подібності хімічного складу первісного металу паласитів і доакреційного металу в хондритах; 3) наявність пор на металевих і відсутність на олівінових зернах; 4) наявність

кульок, бризок і потоків роз-плаву, а також конденсаційних продуктів лише на поверхні зерен олівіну, що зумовлено, ймовірно, нижчою теплопровідністю силікатів, ніж металу в процесі ударнометаморфічних перетворень; 5) різний характер розвитку і морфології гідроксидних утворень, що пов'язано з відмінностями у стійкості олівіну і нікелістого заліза до вивітрювання, а також з різним механізмом їх зміни в земних умовах.

Зіставлення скульптурних елементів у паласитах і хондритах дало змогу дійти висновку, що характер їхнього поширення і розвитку відображає відмінності в умовах утворення цих типів метеоритів. Так, більші розміри зерен мінералів і їх включень, а також відсутність сходинок росту, які є індикатором нерівноважних умов кристалізації, на поверхні зерен олівіну, металу і троїліту в паласитах, вказують на рівноважні умови їх утворення, на відміну від нерівноважних умов мінералоутворення в хондритах. Слід також зауважити, що на поверхні металу паласитів значно менше первинних пор, ніж у хондритах. Наявність первинних пор у металі хондритів розглядали як доказ наявності газових включень у доакреційному нікелістому залізі [6], а саме включень водню, який характеризується високим ступенем розчинності в металі. Можна припустити, що саме ці скульптурні відмінності є додатковим свідченням наявності високотемпературного періоду в історії паласитів, який зумовив істотну дегазацію металічної фази.

Як і в хондритах, на поверхні мінеральних зерен паласитів більш поширеними є вторинні, а не первинні скульптурні елементи, що вказує на значний вплив ударного метаморфізму на первинні структурно-мінералогічні характеристики метеоритів. Попередній аналіз поширеності скульптурних елементів на поверхні зерен олівіну із паласитів Омолон та Брагін засвідчує кращу збереженість первинних скульптур в Омолоні, що може бути пов'язано з інтенсивнішою та багаторазовою ударнометаморфічною історією паласиту Брагін. Водночас за даними трекових та структурно-мінералогічних досліджень [1], термічна історія паласитів Брагін і Омолон подібна як за *PT*-параметрами, так і за схемою послідовності ударних подій. Унаслідок співударів у космосі вони обидва зазнали ударного тиску в межах $(250-300)10^2$ МПа, що супроводжувався підвищенням температури основної маси материнського тіла до 400–450 °С. Наступні удари, які були менш інтенсивними, тобто в межах $(80-130)10^2$ МПа, і низькотемпературними, зумовили незначні зміни в структурі паласитів. До таких змін належать, наприклад, нейманові лінії в камаситі, які на поверхні полікристалічної кульки металу (див. рис. 1, д) діагностовані нами як лінії деформації. Отже, встановлені на електронно-мікроскопічному рівні відмінності у поширенні скульптурних елементів у паласитах Омолон і Брагін вказують на те, що тонкі скульптурні особливості мінеральних зерен метеоритів є чутливішим індикатором фізико-хімічних процесів їх утворення і, особливо еволюції, ніж типові структурно-мінералогічні характеристики метеоритів.

Висновки. 1. Поверхня мінеральних зерен паласитів містить первинні й численні вторинні скульптурні елементи, що є результатом, відповідно, повільного охолодження материнського тіла паласиту та наступного ударного метаморфізму, а також змін у процесі земного вивітрювання.

2. Вторинні скульптури є поширенішими, ніж первинні, що збігається з характером їх розвитку в хондритах.

3. Поширеність первинних скульптур більш обмежена у паласитах порівняно із хондритами, що зумовлено відмінностями у їх космічній історії, а саме диференційованим характером паласитів.

Автори щиро вдячні Л.Ф. Степашко за первинний відбір зерен мінералів із тонких фракцій паласитів, а також В.М. Сливінському за допомогу під час проведення растрових електронно-мікроскопічних досліджень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бондарь Ю.В. Термическая история палласитов по данным минералого-геохимических и трековых исследований: Автореф. дис.... канд. геол.-минерал. наук. – К., 1994. – 22 с.
2. Семененко В.П., Алексеева О.І. Природа кристалів магнетиту в паласиті Брагін // Зап. Укр. мінерал. тов-ва. – 2006. – **3**. – С. 157–160.
3. Семененко В.П., Гирич А.Л. Природа экзотических объектов в метеоритах // Минерал. журн. – 1996. – **18**, № 6. – С. 14–21.
4. Семененко В.П., Гирич А.Л. Хондрит Саратов (L4): I. Скульптура поверхности хондр и некоторые особенности их минералогии // Там же. – 1998. – **20**, № 2. – С. 19–33.
5. Семененко В.П., Гирич А.Л. Хондрит Саратов (L4): II. Природа скульптуры поверхности хондр // Там же. – 1998. – **20**, № 3. – С. 13–21.
6. Семененко В.П., Тертычная Б.В., Клейменов А.В. Скульптура поверхности частиц никелистого железа в хондритах // Метеоритика. – 1987. – Вып. 46. – С. 73–80.
7. Чирвинский П.Н. Палласиты, их минералого-химический состав, положение в ряду других метеоритов. – М.: Недра, 1967. – 219 с.
8. Ширінбекова С.Н., Семененко В.П. Особливості селективного вивітряння атакситу Чінге // Зап. Укр. мінерал. тов-ва. – 2006. – **3**. – С. 196–199.
9. Buseck P.R. Pallasite meteorites – mineralogy, petrology and geochemistry // Geochim. Cosmochim. A. – 1977. – **41**, N 6. – P. 711–740.
10. Christophe Michel-Levy M. // Earth and Planet. Sci. Lett. – 1981. – **54**. – P. 67–80.
11. Das Gupta S.P., Sen Gupta P.R., Dube A. A SEM study of Chainpur chondrules (abstract) // Meteoritics. – 1978. – **13**. – P. 435–438.
12. Davis A.W. The cosmochemical history of the pallasites. II. Chemical fractionation processes in small differentiated planets // Ibid. – 1976. – **11**, N 4. – P. 274–275.
13. Jedwab J. La Magnétite de la Météorite D'Orgueil Vue au Microscope Électronique á Balayage // Icarus. – 1971. – **15**. – P. 319–340.
14. Kerridge J.F., Mackay A.L., Boynton W.V. Magnetite in CI carbonaceous meteorites: Origin by aqueous activity on a planetesimal surface // Sci. – 1979. – **205**. – P. 395–397.
15. Kvasnytsya I.V., Semenenko V.P. SEM-study of a mineral grain surface in pallasites // Meteor. and Planet. Sci. – 2003. – **38**. – P. 10.
16. Rodé O.D. et al. Atlas of photomicrographs of the surface structures of lunar regolith particles. – Prague, 1979. – 76 p.
17. Scott E.R.D. Pallasites-metal composition, classification and relationships with iron meteorites // Geochim. Cosmochim. A. – 1977. – **41**, N 3. – P. 349–360.
18. Semenenko V.P., Tertichnaya B.V. SEM-study of metal grain surface in ordinary chondrites // Lunar. and Planet. Sci. – 1994. – **25**. – P. 1261–1264.
19. Xin Hua, Buseck P.R. Unusual form of magnetite in the Orgueil carbonaceous chondrites // Meteor. and Planet. Sci. – 1998. – **33**. – P. 215–220.

Надійшла 25.03.2008

V.P. Semenenko, I.V. Kvasnytsya, O.I. Alekseyeva, S.N. Shyrinbekova

FEATURES OF SURFACE SCULPTURE OF MINERAL GRAINS FROM PALLASITES

The results of the scanning electron microscopic study of surface sculpture of mineral grains from pallasites are given. It is shown that the fine sculpture features belong to a sensitive indicator of physico-chemical conditions of pallasites formation and evolution in space and on the Earth.