

УДК 523.681

СКУЛЬПТУРА ПОВЕРХНІ ВІДКОЛУ МЕТЕОРИТА ЧЕЛЯБІНСЬК (LL5)

Н. Кичань¹, А. Гіріч¹, С. Ширінбекова¹, В. Сливінський²

¹Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення імені М. П. Семененка НАН України,
просп. акад. Палладіна, 34, 03680 м. Київ-142, Україна

E-mail: cosmin@i.ua

²Державна установа “Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України”,
просп. акад. Палладіна, 34а, 03680 м. Київ-142, Україна

Наведено результати електронно-мікроскопічного вивчення скульптури поверхні відколів світлого і темного різновидів, ударних чорних жилок та кори плавлення метеорита Челябінськ (LL5). Значне поширення в них структур крихкої і пластичної деформації, ударного нагрівання та ударного плавлення підтверджує високий ступінь ударно-метаморфічного перетворення речовини метеорита. Поширення і характер розташування продуктів земного звітрявання на відколах хондрита Челябінськ свідчать про його досить швидке окиснення за земних умов.

Ключові слова: метеорит, хондрит, ударний метаморфізм, скульптура поверхні, нікелісте залізо, троїліт, продукти земного звітрявання.

Постійні зіткнення материнських тіл метеоритів у поясі астероїдів приводять до зміни їхніх первинних структурно-мінералогічних, хімічних і фізичних характеристик та утворення структур ударного метаморфізму. Ударно-метаморфізовані хондрити мають широкий діапазон структур крихкої та пластичної деформації, нагрівання і плавлення [10]. У разі значного поширення структур плавлення рудних мінералів, головно сульфідів, речовина хондритів змінює колір від темно-сірого до чорного, її називають темним різновидом. Близько 15 % звичайних хондритів є світлими і темними різновидами [11]. До таких хондритів належить і метеорит Челябінськ, який випав у вигляді рясного метеоритного дощу 15 лютого 2013 р. Наукові експедиції зібрали понад тисячу взірців загальною масою понад 1 300 кг. Основну масу метеорита (близько 640 кг) пізніше підняли з дна озера Чебаркуль. Попередні дослідження [3–6] засвідчили, що метеорит Челябінськ – це ударна мономіктова брекчія, світлий і темний різновиди якої суттєво не відрізняються за мінеральним і хімічним складом, а також містять ударні чорні жилки. Він належить до звичайних хондритів LL5 з інтенсивним ступенем ударно-метаморфічного перетворення S4-5 і низьким ступенем звітрявання W0.

Два фрагментарні взірці метеорита Челябінськ люб’язно подаровані Комітету з метеоритів НАН України для досліджень кореспонденткою української телестудії ICTV Тетяною Штан і приватним колекціонером Дмитром Пилипенком. Нижче наведено результати електронно-мікроскопічного дослідження поверхні відколів світлого й темного різновидів хондрита Челябінськ, а також ударних чорних жилок і кори плавлення.

Фрагментарний взірець масою 14,8 г і розміром $3,0 \times 2,4$ см складений світлим різновидом хондрита. Другий взірець округлої форми масою 1,1 г і розміром $1,1 \times 0,8$ см складений темним різновидом. Обидва взірці частково покриті корою плавлення й містять ударні чорні жилки.

Під бінокулярном марки МБС-10 відібрано дрібні уламки світлого і темного різновидів хондрита й уламки з чорними жилками та корою плавлення для електронно-мікроскопічного дослідження скульптури поверхні їхніх відколів. Дослідження проводили за допомогою сканувального електронного мікроскопа марки JSM-6490LV фірми Jeol, обладнаного енергодисперсійним спектрометром (EDS) марки INCA Penta FETx3.

Світлий різновид метеорита *Челябінськ* має типову для нерівноважних хондритів [12] нерівномірну грубозернисту будову і містить окремі ксеноморфні зерна нікелістого заліза й троїліту та релікти хондр. У метеориті, особливо в темному різновиді, поширені структури ударного метаморфізму, зокрема пилоподібні та сітчасто-комірчасті структури плавлення сульфідів заліза і Fe,Ni-металу, локальні ділянки плавлення в силікатах і повне переплавлення речовини в ударних чорних жилках.

Відколи світлого різновиду хондрита мають грубозернисту кристалічну будову і ясно-сірий колір. Рудо-бурі плями лімоніту розміром до 5 мм локалізовані навколо окремих зерен нікелістого заліза. На цих відколах діагностовано такі мінерали: олівін, збіднений і збагачений кальцієм піроксени, нормативний плагіоклаз, камасит, теніт, троїліт, хроміт, ільменіт, хлорапатит, самородну мідь і гідроксиди заліза.

Для зерен силікатів, троїліту, хроміту і фосфатів характерні висока тріщинуватість і крихкість, що зумовлено високим ступенем ударно-метаморфічного перетворення хондрита *Челябінськ*. Тому на поверхні досліджуваних відколів ці мінерали представлені головню уламками. Зерна нікелістого заліза складені камаситом і тенітом, мають нерівну рельєфну поверхню (рис. 1, а). У більшості випадків на них простежуються продукти селективного звірювання.

Зерна троїліту мають полікристалічну будову. На їхній поверхні діагностовано сходинки росту, що свідчить про нерівноважні умови кристалізації мінералу. Для кожного монозерна характерна індивідуальна система сходинок росту (див. рис. 1, б). Великі зерна троїліту часто містять округлі включення олівіну або плагіоклазу (до 20 мкм), які мають зародки граней (див. рис. 1, в).

В окремих зернах знайдено заглиблення кубічної форми (див. рис. 1, г), що залишились після викришування ідіоморфних включень мікронного розміру. Аналогічні мікронні кубічні включення, складені хромітом, знайдено на поверхні зерен нікелістого заліза в хондриті *Галків* [2]. Тому, враховуючи кубічну форму й високу крихкість включень, що викришилися, можна припустити, що вони були складені хромітом. Розташування включень уздовж меж монокристалів троїліту та їхній переважно високий ступінь ідіоморфізму свідчать про їхнє утворення внаслідок твердофазової дифузії під час повільного охолодження.

На відколах зерен троїліту простежуються системи паралельних пластинок; у полікристалічних зернах напрям розташування пластинок відрізняється для окремих монокристалів (див. рис. 1, в). Системи паралельних пластинок належать до структур пластичної деформації й утворились, імовірно, унаслідок деформації зсуву кристалічної ґратки троїліту в разі помірного ударного метаморфізму. Тріщини в полікристалічних зернах троїліту розташовані головню за межами монокристалів (див. рис. 1, б).

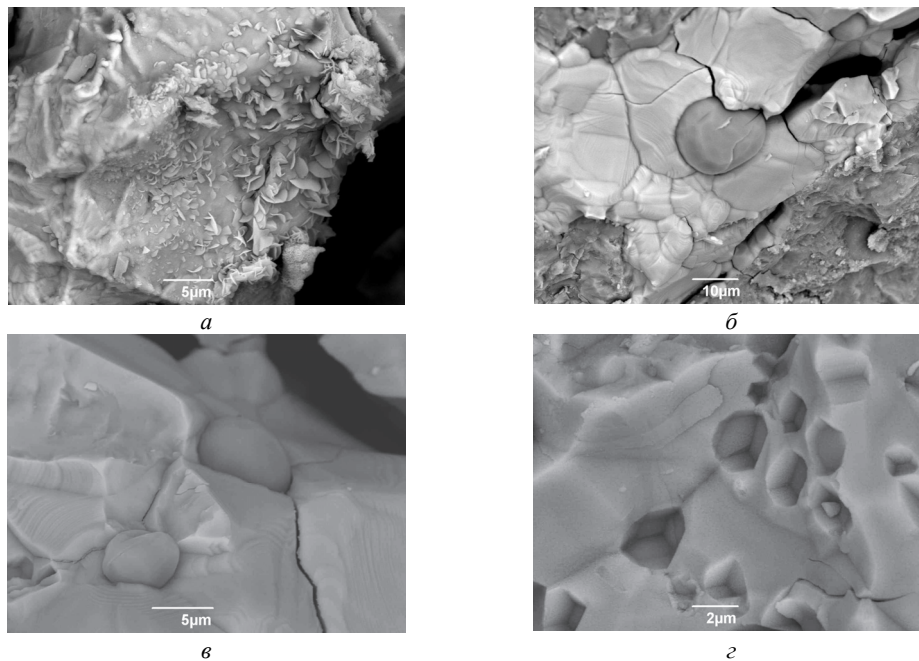


Рис. 1. Електронно-мікроскопічне зображення у відбитих електронах (BSE) скульптури поверхні зерен мінералів, розташованих на відколах світлого різновиду хондрита *Челябінськ*:

а – зерно теніту, на рельєфній поверхні якого розташовані продукти селективного звітрювання; *б* – округле із зародками граней включення плагіоклазу (темно-сіре, посередині) у полікристалічному зерні троїліту (ясно-сіре). Кожне монозерно має індивідуальну систему сходинок росту; *в* – округлі з зародками граней включення олівіну в полікристалічному зерні троїліту, на відколах якого (ліворуч) видно системи паралельних пластинок деформації зсуву; *г* – заглиблення кубічної форми на відколі полікристалічного зерна троїліту.

На відколах світлого різновиду хондрита *Челябінськ* знайдено локальні ділянки зі структурами плавлення троїліту у вигляді прожилків, що розташовані за тріщинами в силікатах і міжзерновими межами, мікронних кульок та їхніх скупчень на поверхні силікатних зерен, а також зерен глобулярної будови.

На поверхні зерен ільменіту (рис. 2, *а*) діагностовано цікаві системи субпаралельних пластинок за різними кристалографічними напрямками. Виникли такі структури, найімовірніше, унаслідок одночасного двійникування кристалів ільменіту по всіх гранях [11]. Самородна мідь у хондритах звичайно асоціює з нікелістим залізом або наявна у вигляді включень у камаситі [10]. На відколах силікатної частини хондрита знайдено дрібні дендритоподібні й неправильної уламкової форми зерна самородної міді. В окремих випадках вони утворюють агрегати розміром до 30 мкм (див. рис. 2, *б*).

Темний різновид, за літературними даними [3], становить близько 20 об. % хондрита *Челябінськ* і складений реліктами грубозернистої хондритової речовини в чорній переплавленій тонкозернистій матриці. Подарований нам взірець представлений лише грубозернистою частиною, містить релікти мікропорфірових, інколи колосникових хондр і ксеноморфні зерна рудних мінералів. Силікатна маса темного різновиду пронизана тонкими прожилками сульфідів заліза та Fe,Ni-металу за міжзерновими межами і по тріщи-

нах у зернах силікатів (рис. 3, *a*), хроміту й фосфатів. Відколи темно-сірого до чорного кольору і нерівномірної грубозернистої будови. Окремі ділянки мають рівномірну більш дрібнозернисту структуру і, ймовірно, є відколами реліктів хондр. На відколах темного різновиду діагностовано олівін, збіднений і збагачений кальцієм піроксени, нормативний плагіоклаз, теніт, троїліт, хроміт, мериліт і хлорапатит.

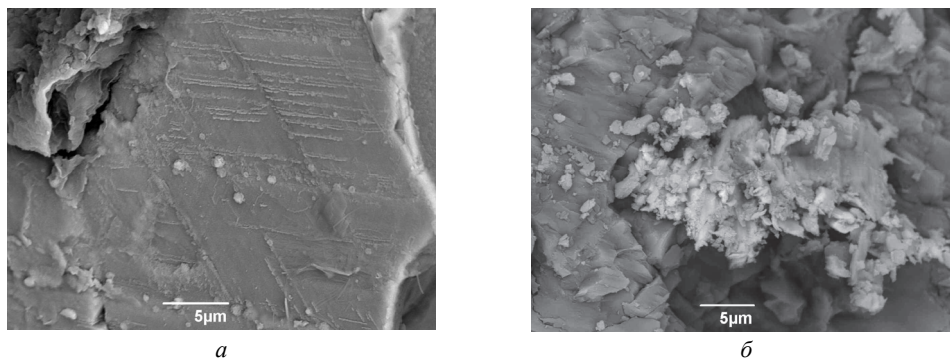


Рис. 2. BSE-зображення скульптури поверхні зерен рудних мінералів, розташованих на відколах світлого різновиду хондрита *Челябінськ*:
a – система субпаралельних пластинок на поверхні зерна ільменіту; *б* – агрегат дендритоподібних зерен міді (ясно-сіре).

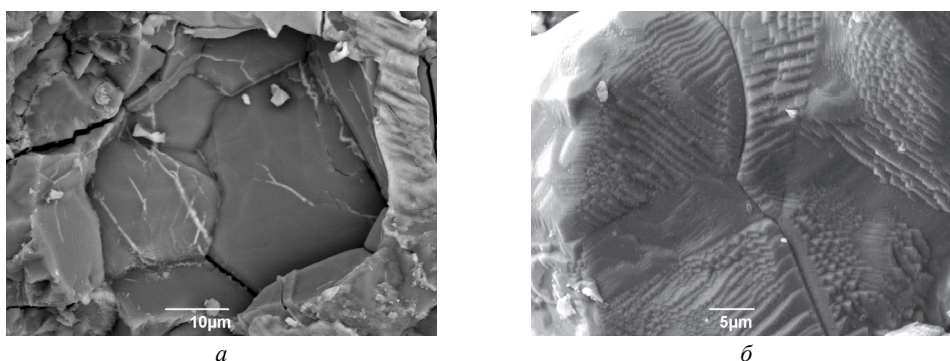


Рис. 3. Електронно-мікроскопічне зображення у відбитих (*a*) і вторинних (*б*) електронах (SEM) скульптури поверхні зерен мінералів, розташованих на відколах темного різновиду хондрита *Челябінськ*:
a – прожилки троїліту (ясно-сіре), розташовані по тріщинах у силікатах і за міжзерновими межами; *б* – складна система сходинок росту на поверхні зерна теніту.

Як і на відколах світлого різновиду хондрита, зерна силікатів, хроміту й фосфатів представлені головню уламками. Зерна теніту мають складну систему сходинок росту (див. рис. 3, *б*). Таких ускладнених сходинок росту нема на поверхні зерен теніту в світлому різновиді й загалом вони не характерні для зерен нікелістого заліза в хондритах [8, 10]. Проте аналогічні сходинок росту зафіксовані іншими дослідниками [3] на поверхні зерен теніту, що розташовані в порожнинах переплавлених ділянок темного різновиду хондрита *Челябінськ*. Зерна троїліту мають такі самі скульптурні елементи, як і світлий різновид хондрита. Продуктів земного звітрювання практично нема.

Ударні чорні жилки завширшки до 1 мм складені тонкорозкристалізованим силікатним склом і містять окремі грубі зерна олівину й піроксену та численні дрібні зерна нікелістого заліза і троїліту. Для їхніх відколів характерна прихованокристалічна, місцями тонкозерниста будова (рис. 4, *a*). Окремі ділянки мають скляний блиск. На відколі однієї з чорних жилок знайдено сітчасто-комірчасту структуру плавлення (див. рис. 4, *б*). Зазвичай, силікати в таких структурах формують комірки, а троїліт, метал або іюцит [2] – каркас. У цьому випадку каркас складений троїлітом.

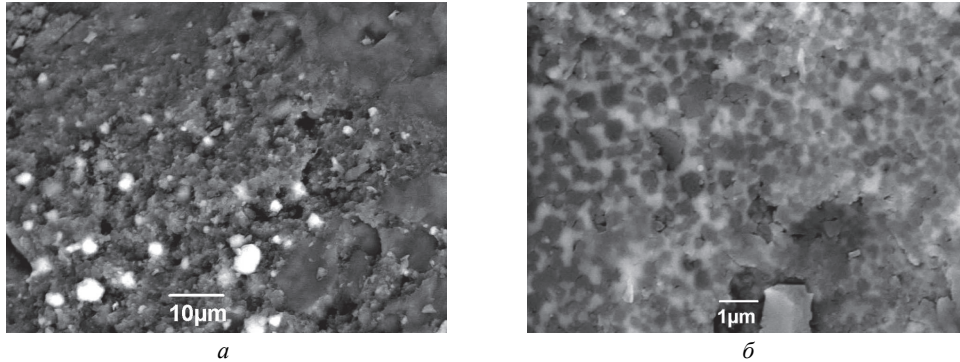


Рис. 4. BSE-зображення поверхні відколу ударних чорних жилок хондрита *Челябінськ*:

a – дрібні округлі зерна нікелістого заліза і троїліту (біле), розташовані в тонкорозкристалізованому силікатному склі; *б* – сітчасто-комірчаста структура плавлення троїліту (ясно-сіре), у комірках якої розташовані зерна олівину й піроксену (сіре, темно-сіре).

Кора плавлення пориста, чорна, зональна, утворена слабо розкристалізованим склом олівінового складу. Її товщина змінюється в широких межах – від 20 до 370 мкм. Зовнішня зона переповнена скелетними й ідіоморфними кристалами магнетиту мікронного і субмікронного розміру. Внутрішня зона не містить кристалів магнетиту, за невеликої товщини кори плавлення її може не бути. Поверхня кори плавлення горбиста, з численними порами (рис. 5, *a*). За великого збільшення на ній добре видно мікрокристали магнетиту (див. рис. 5, *б*). На відколах кора плавлення має прихованокристалічну структуру (див. рис. 5, *в*). Поодинокі рудні кульки (див. рис. 5, *г*) мікронного розміру простежуються як на поверхні, так і на відколах кори плавлення. Округлі та амебоподібні пори розміром до 50 мкм (див. рис. 5, *в*), інколи з'єднані між собою, поширені нерівномірно.

Продукти земного звітрювання є лише на відколах взірця світлого різновиду хондрита. Більшість із них генетично пов'язана з зернами нікелістого заліза, менше – троїліту. За морфологією і ступенем розкристалізації корозійні продукти розділено на такі групи: 1) дисперсні і слабо розкристалізовані пористі кірки; 2) слабо розкристалізовані ниркоподібні натічні агрегати (рис. 6, *a*), з якими асоціюють мікронні й субмікронні сфероїдальні утворення; 3) розкристалізовані кірки (див. рис. 6, *б*), складені субмікронними голчастими і пластинчастими кристалами; 4) голчасті й пластинчасті мікрокристали (див. рис. 1, *a* та 6, *a*, *в*), зокрема дископодібні (див. рис. 6, *г*), що ростуть перпендикулярно до поверхні відколу. Агрегати різних за розміром і орієнтованих мікрокристалів іноді утворюють зональні структури; 5) частково зруйновані сфероїдальні утворення з гладкими зовнішніми і тонкорозкристалізованими внутрішніми стінками (див. рис. 6, *в*). Аналогічні сфероїдальні утворення виявили раніше на відколах інших хондритів [7].

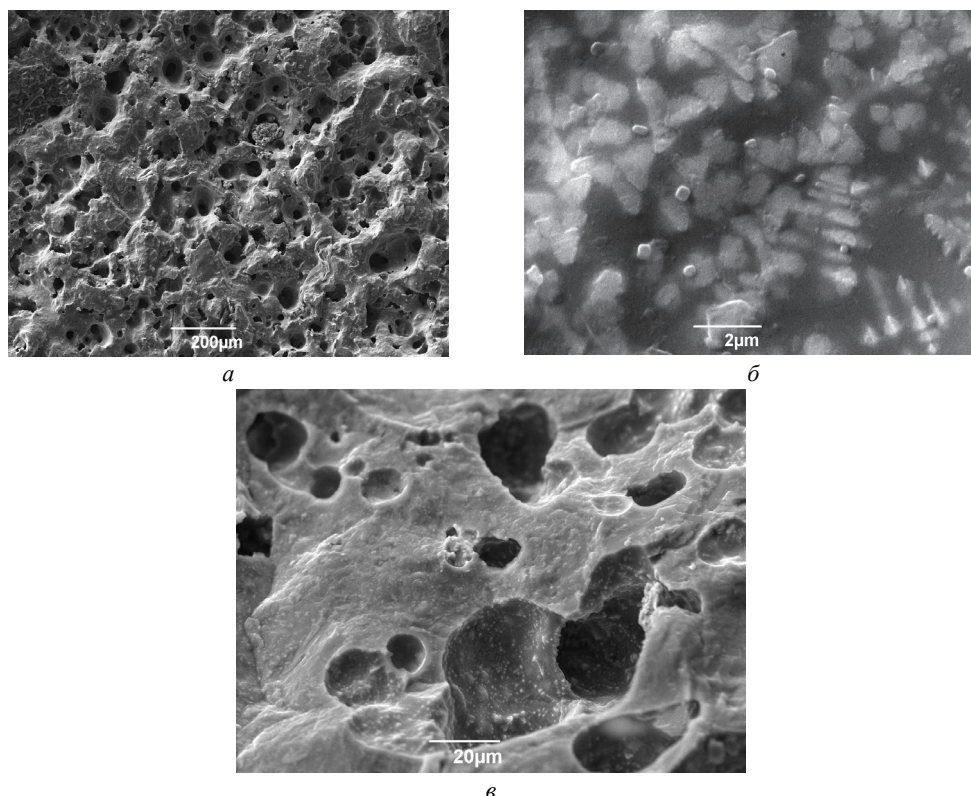


Рис. 5. SEM-зображення кори плавлення хондрита *Челябінськ*:

a – пориста будова поверхні кори плавлення; *б* – мікрочастинки магнетиту на поверхні кори плавлення; *в* – прихованокристалічна структура відколу кори плавлення. Пори інколи з'єднані між собою; *г* – мікронні кульки, складені рудними мінералами, на відколі кори плавлення.

Хімічний склад продуктів звітрювання, який визначали методом EDS, дає підстави припустити, що вони складені тонкими сумішами оксидів і окси-гідроксидів заліза. За морфологією й аналогією з продуктами корозії залізних метеоритів *Сіхоте-Алінь* і *Чінге* [9], найімовірнішими серед них фазами є гетит і лімоніт (слабко розкристалізовані дисперсні кірки й ниркоподібні агрегати), а також магхеміт і лепідокрокіт (голчасті й пластинчасті мікрочастинки) [1].

Отже, виконані дослідження скульптури поверхні світлого і темного різновидів хондрита *Челябінськ* підтверджують високий ступінь ударно-метаморфічного перетворення [13] речовини метеорита і значне поширення в ньому структур ударного метаморфізму. Ми діагностували структури крихкої (тріщинуватість, брекчіювання, розриви, пори, зсуви деформаційних пластинок у троїліті) та пластичної (деформаційні пластинки в троїліті, структури двійникування ільменіту) деформації, структури ударного нагрівання (полікристалічна будова троїліту, включення у Fe,Ni-металі і троїліті) та структури ударного плавлення (пилоподібні, прожилки, кульки та глобулярні зерна троїліту, сітчастокмірчасті структури, повне переплавлення речовини в ударних чорних жилках і корі плавлення).

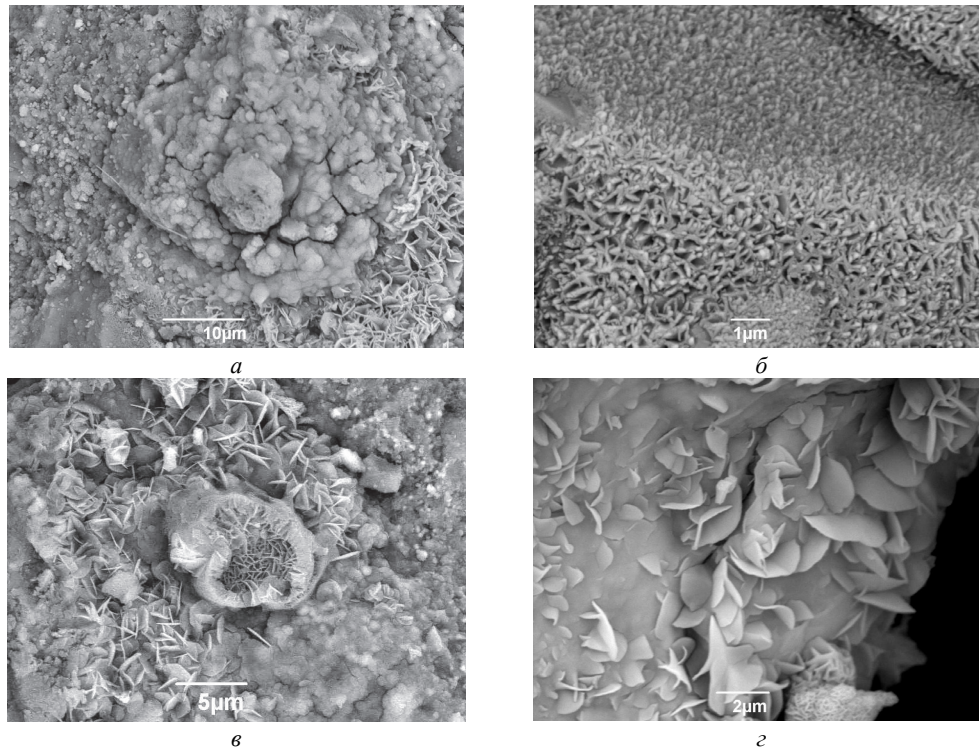


Рис. 6. BSE-зображення продуктів земного звітрювання на відколах світлого різновиду хондрита *Челябінськ*:

а – слабо розкристалізований ніркоподібний натічний агрегат (у центрі). Праворуч і знизу розташовані пластинчасті мікрокристали; *б* – тонка розкристалізована кірка, складена переважно субмікронними голчастими і пластинчастими кристалами; *в* – частково зруйноване сфероїдальне утворення (у центрі) з тонкорозкристалізованими внутрішніми стінками. Зверху й ліворуч розташовані пластинчасті мікрокристали, у нижньому правому куті – слабо розкристалізований натічний агрегат; *г* – дископодібні мікрокристали, розташовані перпендикулярно до поверхні зерна теніту.

Поширення і характер розташування продуктів земного звітрювання на відколах хондрита *Челябінськ* свідчать про його досить швидке окиснення за земних умов. Взірець, складений світлим різновидом, має стадію звітрювання W1, а взірець, складений темним різновидом, – стадію звітрювання W0 [14].

Під час зберігання взірців метеорита треба контролювати рівень вологості й забруднення повітря в лабораторному або музейному середовищі.

Автори глибоко вдячні Тетяні Штан та Дмитру Пилипенку за безкоштовну передачу Комітету з метеоритів НАН України взірців метеорита Челябінськ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гипергенные окислы железа / [Под ред. Н. В. Петровской]. – М. : Наука, 1975. – 207 с.
2. Кичань Н. В. Структурно-мінералогічні особливості нікелістого заліза метеорита Галків / Н. В. Кичань, С. Н. Ширінбекова, В. М. Сливінський // Записки Укр. мінерал. т-ва. – 2009. – № 6. – С. 70–76.
3. Минералогия и петрография “проплавленного” фрагмента метеорита Челябинск / В. В. Шарыгин, Н. С. Карманов, Н. М. Подгорных, А. А. Томиленко // Метеорит Челябинск – год на Земле : Всерос. науч. конф. : материалы. – Челябинск, 2014. – С. 637–653.
4. Особенности минерального и геохимического состава метеорита “Челябинск” / С. В. Берзин, Ю. В. Ерохин, К. С. Иванов, В. В. Хиллер // Литосфера. – 2013. – № 3. – С. 106–117.
5. Петрография, минералогия и строение метеорита “Челябинск” / В. Н. Анфилогов, Е. В. Белогуб, И. А. Блинов [и др.] // Литосфера. – 2013. – № 3. – С. 118–129.
6. Результаты вещественного анализа метеорита Челябинск / Э. М. Галимов, В. П. Колотов, М. А. Назаров [и др.] // Геохимия. – 2013. – № 7. – С. 580–598.
7. Семенов В. П. Природа экзотических объектов в метеоритах / В. П. Семенов, А. Л. Гирич // Минерал. журн. – 1996. – Т. 18, № 6. – С. 14–21.
8. Семенов В. П. Скульптура поверхности частиц никелистого железа в хондритах / В. П. Семенов, Б. В. Тертычная, А. Н. Клейманов // Метеоритика. – 1987. – Вып. 46. – С. 73–80.
9. Склад продуктів земного вивітрювання залізних метеоритів Сіхоте-Алінь і Чінге за даними мессбауєрівської спектроскопії та рентгенофазового аналізу / В. П. Іваницький, С. Н. Ширінбекова, О. Є. Гречановська, Е. В. Польшин // Мінерал. журн. – 2014. – Т. 36, № 4. – С. 66–76.
10. Собонович Э. В. Вещество метеоритов / Э. В. Собонович, В. П. Семенов. – Киев : Наук. думка, 1984. – 191 с.
11. Юдин И. А. Минералогия метеоритов / И. А. Юдин, В. Д. Коломенский. – Свердловск : УНТЦ АН СССР, 1987. – 200 с.
12. Classification of meteorites / A. N. Krot, K. Keil, C. A. Goodrich, E. R. D. Scott // Treatise on Geochemistry. Vol. 1. Meteorites, Comets and Planets / [Ed. A. M. Davis]. – Elsevier; Pergamon, 2004. – P. 83–128.
13. Stöffler D. Shock metamorphism of ordinary chondrites / D. Stöffler, K. Keil, E. R. D. Scott // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1991. – Vol. 55. – P. 3845–3867.
14. Wlotzka F. A weathering scale for the ordinary chondrites / F. Wlotzka // Meteoritics. – 1993. – Vol. 28. – P. 460.

*Стаття: надійшла до редакції 31.07.2015
прийнята до друку 23.10.2015*

SCULPTURE OF BROKEN SURFACE OF THE *CHELYABINSK* (LL5) METEORITE

N. Kychan¹, A. Girich¹, S. Shyrinbekova¹, V. Slyvinskyi²

¹*M. P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of NASU,
34, Acad. Palladin Av., 03680, Kyiv-142, Ukraine
E-mail: cosmin@i.ua*

²*Institute of Environmental Geochemistry of NASU,
34a, Acad. Palladin Av., 03680 Kyiv-142, Ukraine*

The results of electron-microscopic study of a surface sculpture of the light and dark lithologies, black shock veins and melting crust of the *Chelyabinsk* (LL5) meteorite are given.

The high stage of a shock metamorphism and widespread of the shock metamorphism structures within the chondrite have been found.

We discovered structures of the fragile (cracks, breccias, breaks, pores, displacement of deformation plates within troilite) and plastic deformations (deformation plates within troilite, twinning structures within ilmenite); shock heating structures (polycrystalline grains of troilite, inclusions within Fe,Ni-metal and troilite) and shock melting structures (dusty-like grains, shock veins, beads, globular grains of troilite, cellular melting structure, complete melting of material in black shock veins and melting crust).

Spreading and character of location of the terrestrial weathering products at a broken surface of the *Chelyabinsk* chondrite indicate its rapid oxidation in terrestrial conditions. The light lithology sample is characterized of W1 weathering stage, and the dark lithology sample has W0 wearing stage.

It is necessary to control a level of humidity and air pollution in laboratory and museum environments during storage meteorite samples.

Key words: meteorite, chondrite, shock metamorphism, surface sculpture, iron nickel, troilite, terrestrial weathering.