

УДК 523.681

С.Н. Ширінбекова

Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення
ім. М.П. Семененка НАН України
03680, м. Київ-142, Україна, пр. Акад. Палладіна, 34
E-mail: cosmin@ua

ТОНКІ МОРФОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ПРОДУКТІВ ЗЕМНОГО ВИВІТРЮВАННЯ В МЕТЕОРИТАХ

Наведено узагальнені дані з морфології продуктів земного вивітрювання метеоритів із колекції Національного науково-природничого музею НАН України. Запропоновано морфологічну класифікацію продуктів вивітрювання в усіх типах метеоритів. Продукти вивітрювання вперше класифіковано на три типи: площинний, ізометричний і видовжений, що характеризують просторове розміщення і особливості морфології вторинних екзогенних мінералів у метеоритних зразках. Екзогенні мінерали в метеоритах генетично пов'язані переважно із нікелестим залізом та складаються в основному з оксидів і оксигідроксидів заліза — маггеміту, гетиту, гідрогетиту (лімоніту), лепідокрокіту та СІ-вмісного акаганеїту. Менш поширеними є вторинні сульфідні — фрамбоїдний пірит, Си-вмісний сульфід, що утворились унаслідок вивітрювання троїліту та, можливо, самородної міді. Морфологічне різноманіття вторинних мінералів у метеоритах виникло в результаті трансформації нестійких фаз оксигідроксидів заліза в процесі нерівномірного вивітрювання метеоритної речовини. Присутність кулькоподібних агрегатів акаганеїту з вмістом СІ до 3—5 % свідчить про активну корозію (Fe, Ni)-металу в зразках метеоритів-знахідок, що необхідно враховувати під час зберігання метеоритної речовини у лабораторіях і музейних умовах.

Ключові слова: метеорити, продукти земного вивітрювання, акаганеїт, гетит, морфологічна класифікація.

Вступ. Метеорити є унікальним індикатором процесів мінералоутворення в космосі, джерелом інформації про еволюцію космічної речовини, про походження і ранню історію Сонячної системи [13]. В окиснювальному середовищі земної поверхні метеоритна речовина зазнає хімічних, мінеральних, ізотопних і структурних змін. Під впливом процесів вивітрювання в метеоритах формуються вторинні екзогенні фази за рахунок заміщення первинних космічних мінералів. Найбільш розповсюдженими екзогенними мінералами в метеоритах є оксиди і оксигідроксиди заліза, які виникли внаслідок окиснення і гідратації нікелестого заліза, троїліту, силікатів; менш поширеними є вторинні карбонати, сульфати, деякі глинисті мінерали, хлориди та водні фосфати [17, 20, 30]. Продукти вивітрювання ускладнюють діагностику низки космічних мінералів, які утворились у доземний період, на-

приклад, у результаті водних змін у материнських тілах метеоритів [27]. Повністю вивітрені метеорити втрачають свою виключну наукову цінність.

Актуальність вивчення продуктів вивітрювання, що утворюються в метеоритах за час їх земної історії, обумовлена необхідністю запобігти руйнуванню і деградації речовини метеоритів під час зберігання у складі метеоритних колекцій, у музейних і лабораторних умовах. Для вирішення поставленої задачі зі збереження метеоритної речовини необхідно оцінити ступінь вторинних змін у метеоритних зразках на основі систематичного моніторингу продуктів земного вивітрювання. Дослідження морфологічних особливостей екзогенних мінералів, визначення їхнього хімічного і фазового складу дозволить встановити їх генетичний зв'язок із первинними метеоритними мінералами, виявити найбільш агресивні корозійні продукти та з'ясувати причини вивітрювання метеоритів у земному середовищі.

© С.Н. ШИРІНБЕКОВА, 2016

У попередніх дослідженнях структурно-мінералогічних змін різних типів метеоритів у земних умовах нами було вивчено морфологію, хімічний і фазовий склад продуктів вивітрювання у зразках залізних метеоритів [3, 15]; класифіковано звичайні хондрити за ступенем вивітрювання [14]; встановлено особливості земного вивітрювання хондритів [4, 5, 8] та паласитів [10].

Мета роботи — доповнення, систематизація та узагальнення даних із особливостей земного вивітрювання метеоритної речовини, розробка морфологічної класифікації продуктів вивітрювання у зразках із різних типів метеоритів, виявлення агресивних корозійних фаз.

Об'єкти і методи. Нами досліджено морфологічні особливості продуктів вивітрювання у вивітрених зразках 13 метеоритів із усіх типів, які зберігаються в колекції Національного науково-природничого музею (ННПМ) НАН України. З них вісім кам'яних, два залізних і три залізо-кам'яних; 10 падінь і три знахідки метеоритів. Кам'яні метеорити — це звичайні хондрити *Біла Церква* (H5-6, падіння 1796 р.), *Бердянськ* (L5, знахідка 1978 р.), *Галків* (H4, падіння 1995 р.), *Грузьке* (H4, знахідка 2007 р.), *Жовтневий Хутір* (H5, падіння 1938 р.), *Княгиня* (L5, падіння 1866 р.), *Кулішівка* (L6, падіння 1811 р.), *Оленівка* (L5, падіння 1951 р.), які походять з території України. Залізні метеорити — октаедрит *Сіхоте-Алінь* (ПВ, падіння 1947 р., Росія) і атаксит *Чінге* (IVB-ANOM, знахідка 1913 р., Росія). Залізо-кам'яні — паласити *Bragin* (PMG, знахідка 1810 р., Білорусь), *Красноярськ* (PMG, знахідка 1749, Росія) і *Омолон* (PMG, падіння 1981 р., Росія) [7].

Вивітрени метеоритні зразки були представлені пластинками нікелістого заліза з усіх типів метеоритів, відколами звичайних хондритів, зернами олівіну з паласитів та одним осколковим екземпляром октаедриту Сіхоте-Алінь. Екзогенні зміни хондритів також вивчено у прозорих і полірованих шліфах. Метеоритні зразки були нерівномірно вкриті плямами іржі. Розшарованість металевих пластинок із атакситу Чінге та підвищена крихкість відколів хондритів ускладнювали їх відбір і підготовку для електронно-мікроскопічних досліджень.

Тонкі морфологічні особливості продуктів вивітрювання метеоритів досліджено за допомогою оптично- і електронно-мікроскопічних методів з використанням таких приладів: 1) біокуляр МБС-10; 2) поляризаційний оп-

тичний мікроскоп ПОЛАМ Р-312; оптичний мікроскоп *Nikon Eclipse LV100POL*; 3) сканувальні електронні мікроскопи фірми *JEOL*: марки *JSM-6490 LV* з енергодисперсійним спектрометром (ЕДС) марки *INCA Penta FETx3* (ДУ "Інститут геохімії навколишнього середовища (ІГНС) НАН України"; *JSM-6060 LA* (Інститут ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України) та *JSM 6700F*, обладнаний ЕДС приставкою *JED2300* (Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення (ІГМР) ім. М.П. Семененка НАН України). За допомогою ЕДС приставок визначено хімічний склад екзогенних мінералів у метеоритах.

Результати і обговорення. У вивітрених метеоритних зразках спостережено різноманітну морфологію екзогенних мінеральних фаз, що пов'язано із поверхневим і проникним вивітрюванням метеоритної речовини, пріоритетною корозією камаситу і плеситу, меншою мірою — теніту і троїліту. Продукти корозії нікелістого заліза представлені аморфною фазою, дисперсними сумішами і тонкими кристалічними агрегатами оксидів і оксигідроксидів заліза. За нашими і літературними даними, серед продуктів вивітрювання (Fe, Ni)-металу в метеоритах діагностовано такі фази: гематит $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ [23, 29], маггеміт $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ [3, 23], магнетит FeFe_2O_4 [23]; гетит $\alpha\text{-FeOOH}$ [3, 8, 15, 17, 31], гідрогетит $\text{FeOOH} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ [5, 15, 17], лепідокрокит $\gamma\text{-FeOOH}$ [11, 15, 29], Сl-вмісний акаганейт $\beta\text{-FeOOH}$ [15, 17, 21–23], гель гідроксиду заліза [17] та, імовірно, феригідрит $\text{Fe}_{10}^{3+}\text{O}_{14}(\text{OH})_2$ [20, 29]. Припускаємо, що аморфною фазою може бути фероксигіт $\delta\text{-FeOOH}$, який був виявлений дослідниками в продуктах корозії залізних артефактів [25]. На поверхні вивітреної металеві пластинки з хондрита Галків були знайдені в незначній кількості вторинні сульфідні — фрамбоїдний пірит та Сu-вмісний сульфід, які, очевидно, утворились у процесі вивітрювання троїліту, що містив самородну мідь [4].

Продукти земного вивітрювання, а також контамінації у зразках метеоритів нами вперше класифіковано на три морфологічних типи: площинний, ізометричний та видовжений; перші два більш поширені.

1. *Площинний тип*: а) натічні форми — оксидні плівки і шаруваті мікрокірки, які широко розвинуті вже на початку вивітрювання по пластинках (Fe, Ni)-металу в усіх типах метеоритів, по металевих і силікатних зернах на від-

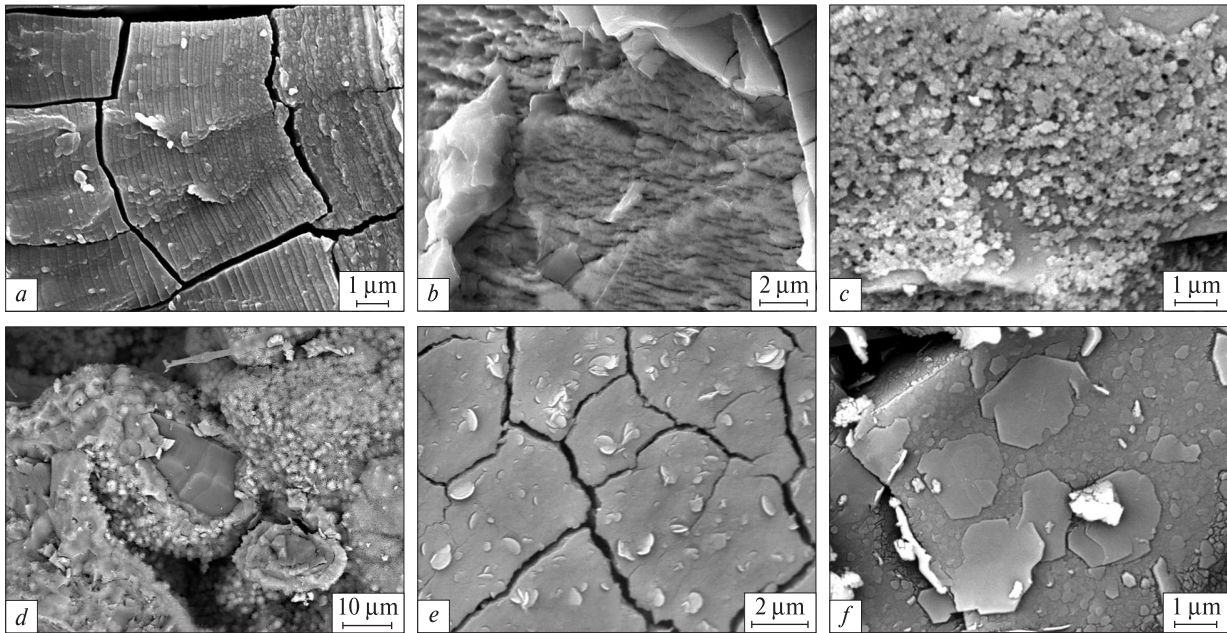


Рис. 1. Різновиди оксидних мікрокірок на поверхні метеоритних зразків. По пластинках нікелістого заліза: *a* — концентрична лускоподібна будова блоків дегідратації в структурі оксидної кірки, атаксит Чінге, *b* — пориста кірка, паласит Красноярськ; *c* — крихка кірка лускоподібної будови по зерну (Fe, Ni)-металу, відкол хондрита Біла Церква, *d* — концентрично-зональна оксидна оболонка навколо силікатних зерен, відкол хондрита Грузьке; *e* — зародки дископодібних кристалів гематиту (?) у кірці по зерну (Fe, Ni)-металу, *f* — мікрокірка рідкісної будови: агрегати пластинчастих кристалів гематиту (?), розташованих паралельно до поверхні відколу хондрита Біла Церква

Fig. 1. The corrosive oxide layer varieties, that coated the meteorite samples: oxide layer on the surfaces of (Fe-Ni)-metal plates from *a* — the Chinga ataxite, *b* — the Krasnojarsk pallasite; *c* — flaky structure of the surface coating on the (Fe-Ni) grain, *d* — layered coating around silicate grains, split of the Gruz'ke chondrite; *e* — nuclei of a disk-shaped crystals probably of hematite in the coating structure on the (Fe-Ni)-metal grain, *f* — rare uncommon structure of coating that consists of scaly crystals of hematite (?) disposed parallel to the meteorite sample surface; *c*, *e*, *f* — split of the Bělajka Zerkov chondrite

колах хондритів (рис. 1, *a–f*), по зернах олівину з паласитів (рис. 2, *a–e*); б) мікрожили і прожилки гідроксидів заліза, які, згідно з класифікацією стадій вивітрювання хондритів [32], утворюються на першій стадії вивітрювання в силікатній матриці хондритів (рис. 3, *a*), а також проникають усередину полікристалічних зерен нікелістого заліза і троїліту по межах між кристалами (рис. 3, *b, c*); в) зональні гідроксидні оболонки по периферії зерен (Fe, Ni)-металу (рис. 3, *c*), меншою мірою навколо троїліту.

Площинний тип характеризує просторове розміщення і морфологію екзогенних фаз у метеоритних зразках та відображає поверхнєве (оксидні плівки, кірки) та проникне (жили, прожилки, оболонки гідроксидів Fe) вивітрювання метеоритної речовини. Площинні форми складаються переважно з тонких сумішей оксигідроксидів Fe, що характеризуються коломорфною структурою з елементами мікролітової будови [14, 16].

У будові дисперсних корозійних кірок по нікелістому залізу з різних типів метеоритів та по олівину з паласитів часто спостерігались ознаки дегідратації у вигляді блоків дегідратації, розбитих радіальними і кільцевими тріщинами (рис. 1, *a, e*; 2, *a*). Виявлено концентричну лускоподібну будову блоків дегідратації в структурі оксидної кірки на поверхні металеві пластинки з атакситу Чінге (рис. 1, *a*). Дисперсні оксидні кірки характеризувалися крихкою, пористою, шаруватою будовою (рис. 1, *b–d*; 2, *a, b*). На відколах деяких хондритів (наприклад, метеорита Грузьке) були широко розвинуті оксидні кірки, що вкривали силікатні зерна (рис. 1, *d*) та склалися з коломорфних агрегатів із характерним горбкуватим мікрорельєфом. Дисперсні та коломорфні агрегати є типовими для гетиту і гідрогетиту (лімоніту) [1, 6, 16, 17]. У дегідратованих дисперсних кірках інколи знаходились зародкові мікрокристали дископодібної та полігональної форми, ймо-

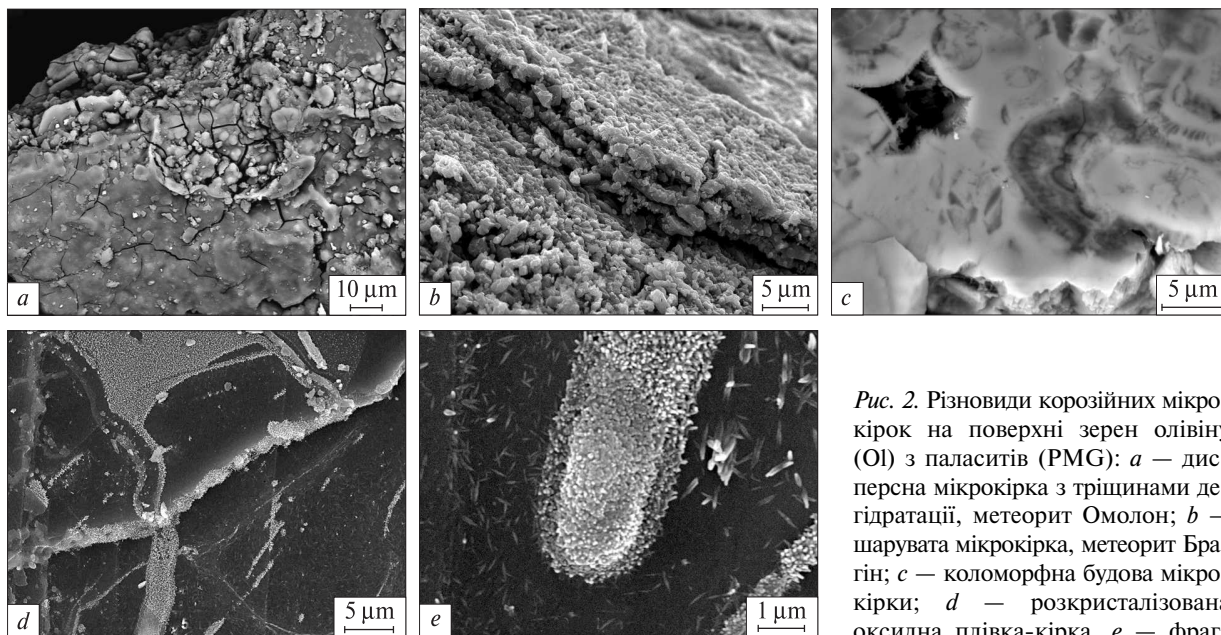


Рис. 2. Різновиди корозійних мікрокірок на поверхні зерен олівіну (Ol) з паласитів (PMG): *a* — дисперсна мікрокірка з тріщинами дегідратації, метеорит Омолон; *b* — шарувата мікрокірка, метеорит Брагін; *c* — коломорфна будова мікрокірки; *d* — розкристалізована оксидна плівка-кірка, *e* — фрагмент

тонкої будови видовженої ділянки мікрокірки, що складається з голчастих нанокристалів та їх агрегатів, напевно, гетиту; *c* — *e* — метеорит Красноярськ

Fig. 2. Various corrosive layers (oxide coating), that coated the olivine grains from the pallasites: *a* — cracked structure of the oxide coating due to dehydration, the Omolon (PMG); *b* — layered structure of the coating, the Brahin (PMG), *c* — collomorphic structure of the coating; *d*, *e* — fine-grained structure of coating that are composed of nanometer-sized crystals probably of goethite; *c* — *e* — the Krasnojarsk (PMG)

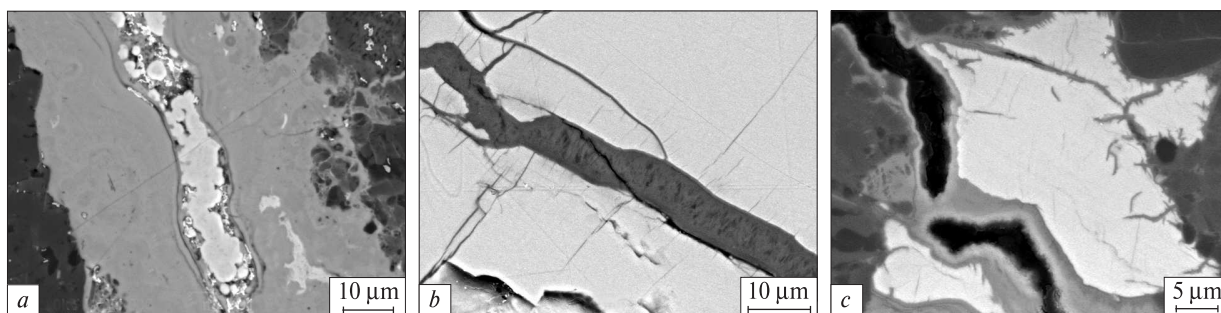


Рис. 3. Гідроксидні жили і прожилки, оболонки, полірований шліф хондрита Грузьке: *a* — зональна гідроксидна жила в силікатній матриці: коломорфна та оолітоподібна будова, відповідно, периферійної темно-сірої і центральної світло-сірої зон; *b* — гідроксидна жила в ударно-метаморфізованому зерні троїліту складена з паралельноволокнистого агрегату, можливо, лепідокрокіту або гетиту; *c* — вивітрене зерно нікелістого заліза, по периферії якого утворилась гідроксидна оболонка з тонкими дендритоподібними прожилками, посередині зерно пронизане зональною гідроксидною жилою з порожнистими ділянками

Fig. 3. Ferric hydroxide (oxide) veins and veinlets: *a* — zonal vein developed in the silicate matrix; *b* — oxide veinlet developed within a troilite grain; *c* — oxide rim and thin veinlets developed on the edge of the weathered (Fe-Ni)-metal grain, oxide vein with cavities was formed within the metal grain, polished section of the Gruz'ke chondrite

вірно, гематиту (рис. 1, *e*). У хондриті Біла Церква нами вперше виявлено мікрокірку рідкісної будови, в якій агрегати пластинчастих пінакоїдальних кристалів, можливо, гематиту, були розташовані паралельно до поверхні відколу (рис. 1, *f*).

Уперше нами представлено результати вивчення мікроскульптури вивіреної поверхні

зерен олівіну з паласитів, які були вкриті тонкими корозійними плівками і кірками (рис. 2, *a*–*e*). За будовою кірки поділено на тріщинуваті дисперсні (2, *a*), шаруваті тонкозернисті (2, *b*), коломорфні (рис. 2, *c*), тонко розкристалізовані (2, *d*, *e*). На зерні Ol з паласиту Красноярськ знайдено рідкісну тонку (товщиною <1 мкм) розкристалізовану плівку-кірку, скла-

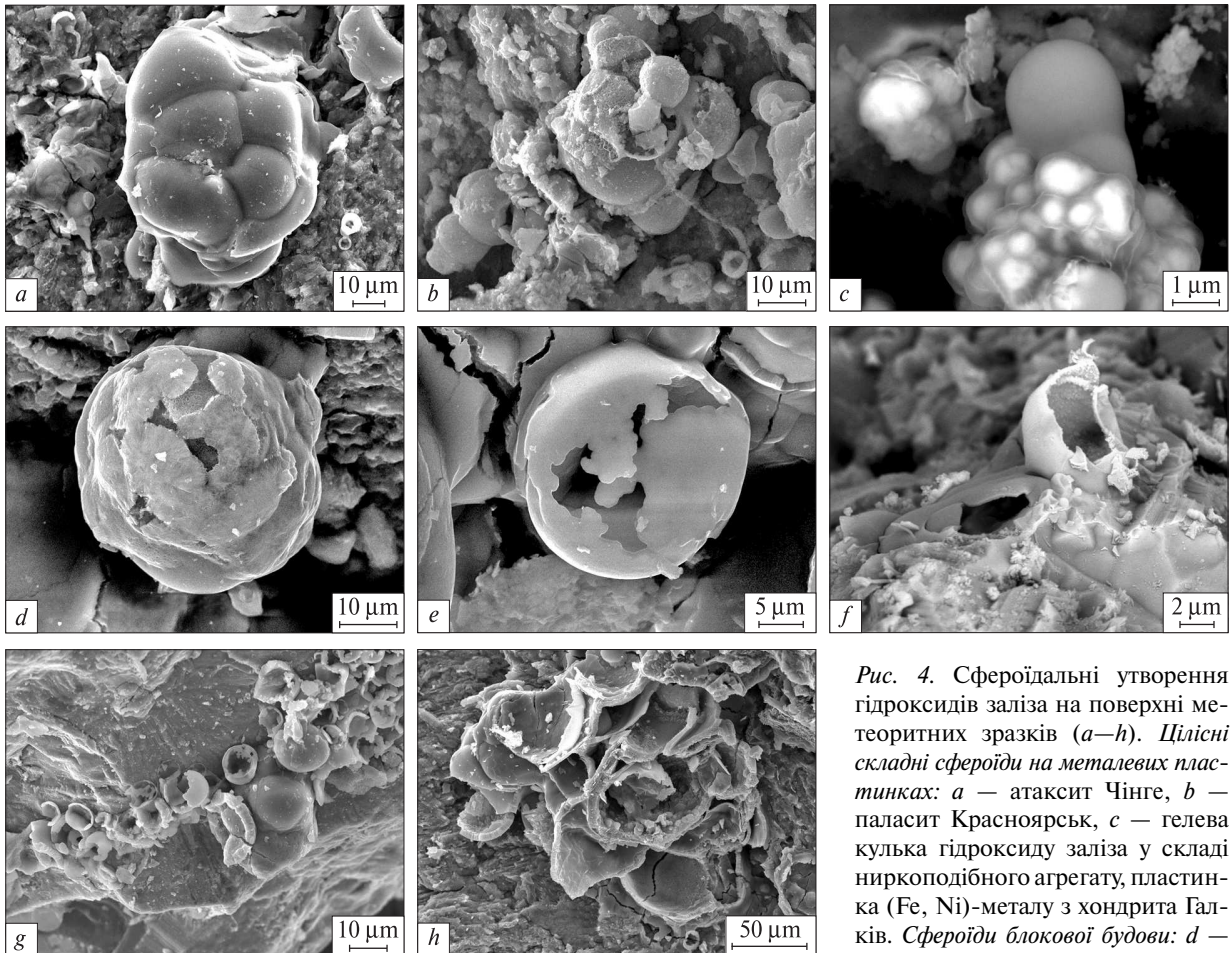


Рис. 4. Сфероїдальні утворення гідроксидів заліза на поверхні метеоритних зразків (а–h). Цілісні складні сфероїди на металевих пластинках: а — атаксит Чінге, б — паласит Красноярськ, с — гелева кулька гідроксиду заліза у складі ниркоподібного агрегату, пластинка (Fe, Ni)-металу з хондрита Галків. Сфероїди блокової будови: d — складний та e — порожнистий, f — на поверхні зерна (Fe, Ni)-металу, відкол хондрита Біла Церква; g — по олівину, паласит Брагін; h — зруйнований сфероїдальний поліагрегат, атаксит Чінге

атаксит Чінге. Розкриті сфероїди: f — на поверхні зерна (Fe, Ni)-металу, відкол хондрита Біла Церква; g — по олівину, паласит Брагін; h — зруйнований сфероїдальний поліагрегат, атаксит Чінге

Fig. 4. Various types of the spherical objects on the meteorite samples surface (a–h). Integral structure: a — the Chinga iron, b — metal plate from the Krasnojarsk pallasite, c — gel ball on the metal plate from the Galkiv chondrite. Spheroids of the block structure: d — complex and e — hollow, metal plates from the Chinga ataxite. Open spherical objects: f — on the surface of the metal grain, split of the Bjelaja Zerkov chondrite, g — on the olivine grain surface, the Brahin pallasite; h — destroyed spherical aggregates, the Chinga iron meteorite

дену з агрегатів нанометрових голчастих кристалів, найімовірніше, гетиту (рис. 2, d, e). Подібну екзогенну структуру, що за складом відповідала гетиту, було отримано на поверхні хондрита *Bensour* (LL6) внаслідок штучного вивітрювання у лабораторних умовах [28]. Видовжені контури та зональна будова цієї тонкої кірки вказують на її первинний пластичний стан і поступове натікання корозійної речовини з подальшою дегідратацією та кристалоутворенням у нанометровому діапазоні.

Гідроксидні мікрожили і оболонки належать до продуктів проникного вивітрювання, розвиваються в речовині звичайних хондритів вже на перших стадіях W1-W2 вивітрювання [14, 32], їх спостережено в полірованих шліфах

кам'яних метеоритів (рис. 3, a–c). Для цих вторинних структур характерними є дисперсність, зональність, коломорфна та, інколи, оолітоподібна будова окремих зон (рис. 3, a). Подекуди в структурі гідроксидних жил і оболонок виявлялися паралельноволокнисті агрегати тонких видовжених мікрочисталів гідроксидів Fe (рис. 3, b). Зерна (Fe, Ni)-металу з дисперсними корозійними оболонками також були знайдені на поверхні відколів хондритів.

У полірованих шліфах хондритів нами спостережено просторову асоціацію екзогенних структур — гідроксидних прожилків і оболонок зі структурами ударного метаморфізму — з тріщинами, деформаціями зсуву, границями кристалів у полікристалічних зернах нікеліс-

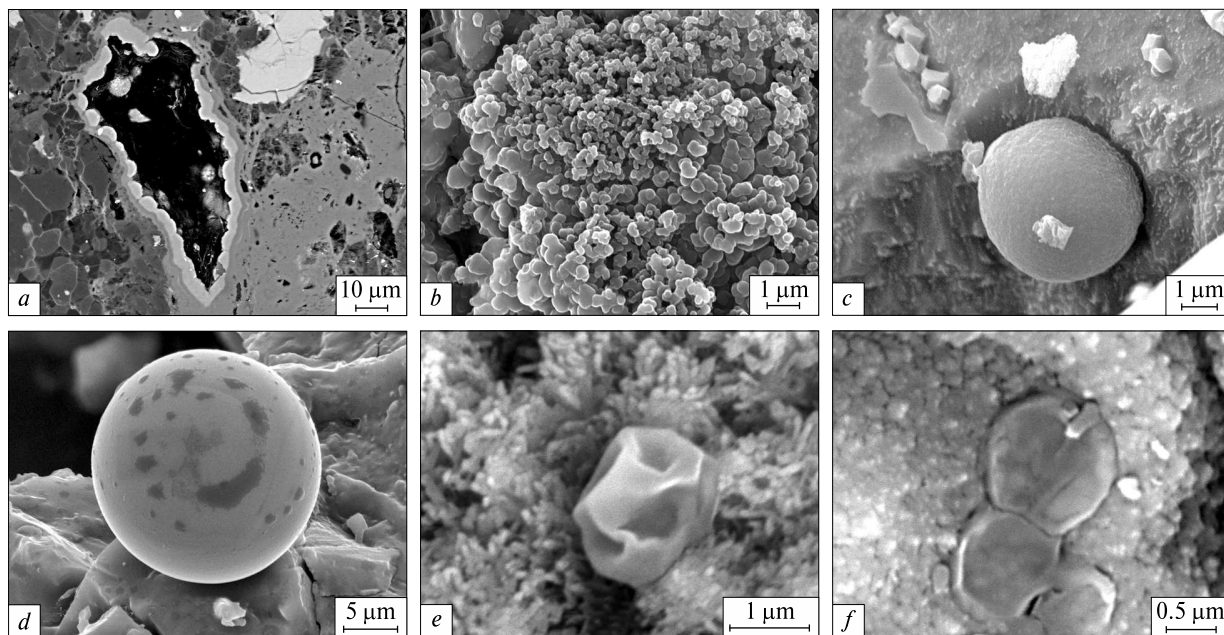


Рис. 5. Ізометричні утворення на поверхні вивітрених зразків метеоритів: *a* — мікросекреція лінозоподібної форми в силікатній матриці, на стінках якої утворились напівсфероїди зональної будови і кульки мікроглобулярної будови, хондрит Грузьке, полірований шліф; *b* — мікроглобулярні агрегати гідроксидів Fe у заглибленні на поверхні металеві пластинки з атакситу Чінге, на якій відсутні кулясті утворення. *Щільні кульки:* *c* — в асоціації з ізометричними субмікриметровими кристалами на поверхні зерна нікелістого заліза, відкол хондрита Біла Церква, *d* — на поверхні відколу хондрита Жовтневий Хутір; *e* — мікроспора. *f* — нез'ясовані біологічні об'єкти, відкол хондрита Грузьке

Fig. 5. The isometric objects that formed on the surface of the weathered meteorite samples: *a* — half-spheric aggregates and globular balls are located on the wall cut and inside on the cavity wall, in the matrix of the Gruz'ke chondrite, polished section; *b* — iron oxide globular microaggregates are located in the (Fe-Ni)-metal plate micropit, the Chinga iron. *Solid balls:* *c* — a ball which is associated with isometric crystals on the surface of the metal grains, the split of the Bjelaja Zerkov chondrite, *d* — a ball on the split surface of the Zhovtnevyi chondrite; *e* — microspore, *f* — unidentified microbiological objects, the split of the Gruz'ke chondrite

того заліза і троїліту. Цей факт дозволяє стверджувати, що ударно-метаморфічні зміни метеоритів є сприятливим фактором для вивітрювання метеоритної речовини в земному середовищі.

2. Ізометричний тип: а) мікросфероїдальні (кулясті) об'єкти (рис. 4, *a–h*), б) натічні гроно- і ниркоподібні агрегати та мікросекреції (рис. 5, *a*); в) мікроглобулярні агрегати (рис. 5, *b*), г) окремі щільні кульки (рис. 5, *c, d*); д) мікроспори (рис. 5, *e, f*).

Ізометричний, а також видовжений типи відображають більшою мірою особливості морфології кристалічних агрегатів екзогенних мінералів, що виникли на поверхні та у мікропорожнинах метеоритних зразків.

Мікросфероїдальні об'єкти утворюють переважно складні агрегати, рідше окремі кульки, які генетично пов'язані з нікелістим залізом. Здебільшого ними вкриті зразки залізних метеоритів і тонкі пластинки (Fe, Ni)-металу з

метеоритів усіх типів. Інколи кульки знаходились на відколах хондритів, в одному випадку вони виростили на корозійній поверхні зерна олівіну з паласиту (рис. 4, *g*).

Ці екзотичні об'єкти були спостережені попередніми дослідниками на свіжих відколах п'яти звичайних хондритів та отримали назву "космічних рослин і квітів" через їхню подібність до рослин [6]. За складом мікрокульки відповідають агресивній корозійній фазі акаганейту, що, як правило, утворюється на фронті реакції окиснення метеоритного заліза [17, 21, 22]. Для стабілізації нестійкої структури акаганейту необхідно входження до неї іонів Cl^- [19], джерелами яких вважають гіпотетичний космічний мінерал лавренсит $FeCl_2$ [6, 17] або навколишнє земне середовище [21, 22]. Ріст мікрокульок на свіжих відколах хондритів пояснюють швидким окисненням дуже нестійкого лавренситу у лабораторних або музейних умовах, який переходить в екзогенний мінерал

молізиту FeCl_3 . Внаслідок гідролізу FeCl_3 утворюються лімоніт, акаганейт, розчин соляної кислоти або пари HCl [6, 17]. В еволюції екзотичних об'єктів виділяють такі стадії [6]: 1) швидкий ріст із пор у метеоритах шляхом ритмічного видування в залежності від коливання кількості води і відносної вологості повітря та під тиском пари HCl (рис. 4, *c*); 2) вибухове розкриття пластичних оболонок із вивільненням пари HCl (рис. 4, *e–g*); 3) твердіння оболонок через втрату води, їх розкristалізація і консервація (рис. 4, *h*).

На поверхні металевих пластинок з атакситу Чінге найбільш поширені затверділі, крихкі сфероїдальні мікроагрегати, які за ступенем збереженості поділено на цілісні закриті (рис. 4, *a–c*) мікрокульки, частково відкриті (рис. 4, *d, f*) та зруйновані поліагрегати (рис. 4, *e, g, h*), що відповідає послідовним етапам еволюції таких об'єктів на поверхні метеоритних зразків, згідно з [6]. Цілісні кулясті об'єкти характеризуються гладкою мікроскульптурою поверхні (рис. 4, *a*). Виокремлюються складні і порожнисті кульки блокової будови (рис. 4, *d, e*). Спостерігалася концентрично-шкаралупчаста будова тонких стінок зруйнованих порожнистих мікрокульок (рис. 4, *h*). Розкristалізовані сфероїди характеризуються типовою для гетиту концентрично-зональною та радіально-променистою будовою [2, 16, 17]. Виявлені нами раніше [15] значні варіації вмісту FeO і NiO у складі сфероїдальних об'єктів вказують на їх утворення внаслідок корозії обох фаз — камаситу і теніту в окиснених пластинках нікелістого заліза з атакситу Чінге. Вміст хлору також суттєво змінювався між кулястими об'єктами, як на їх зовнішніх і внутрішніх стінках, так і на зрізах стінок сфероїдів, у межах від 0,02 до 3–5 % Cl . Отже, високий вміст (3–5 %) хлору в кулястих об'єктах свідчить про наявність Cl -вмісного акаганейту серед продуктів вивітрювання металевих пластинок із атакситу Чінге.

Сфероїди асоціюють із дисперсними мікрокірками, ниркоподібними агрегатами на поверхні метеоритних зразків, головним чином на металевих пластинках. Так, серед ниркоподібних агрегатів на металевій пластинці з хондрита Галків були знайдені рідкісні поодинокі гелеві мікрокульки. Однорідна будова свідчить про їхню пластичність, а просторовий зв'язок із мікропорожнинами в метеоритному залізі вказує на видування їх із пор під час окиснення

(Fe, Ni)-металу (рис. 4, *c*), що відповідає першій стадії еволюції екзотичних об'єктів у ході поверхневої корозії метеоритного заліза [4, 6].

Повідомлялося про розповсюдженість подібних кульок акаганейту в археологічному залізі, що також становить серйозну проблему для збереження залізних артефактів [25].

На вивітреній поверхні відколів хондритів у складі суцільних оксидних кірок поширені ниркоподібні агрегати гетиту. Всередині зруйнованих сфероїдів по нікелістому залізу рідше траплялись гроноподібні агрегати. Для таких натічних агрегатів характерними є сферичні та напівсферичні поверхні. Так, у зразку хондрита Грузьке на зрізі стінок мікросекреції утворилася низка напівсферичних агрегатів, що мали концентрично-зональну будову, а вглибині секреції виникли щільні сфероїди мікроблокової будови (рис. 5, *a*).

У мікрокаверні на поверхні металеві пластинки з атакситу Чінге нами знайдені мікроглобулярні агрегати, які можуть належати до продуктів мікробіологічного вивітрювання (рис. 5, *b*). Подібні утворення також присутні на відколі звичайного хондрита Біла Церква, хоча цей метеорит є падинням. Схожі за морфологією агрегати виникли у залізному метеориті *Casas Grandes* (група ПІАВ) в результаті біокорозії під дією залізобактерій під час експериментів з мікробіологічного вивітрювання метеоритів [24].

Поодинокі щільні мікрокульки, які знаходились на поверхні відколів хондритів, найвірогідніше, є продуктами земної контамінації (рис. 5, *c, d*). До забруднювальних речовин також належить аморфний кремнезем, який діагностували серед продуктів вивітрювання октаедриту Сіхоте-Алінь [3]. Мікроскопічні мінеральні зерна продуктів земного забруднення можуть сприяти вивітрюванню метеоритів.

У зразках деяких метеоритів-знахідок (наприклад, у хондриті Грузьке) присутні біологічні об'єкти ізометричної форми: мікроспора (рис. 5, *e*), ймовірно, пліснявих грибів, та нез'ясовані мікрооб'єкти (рис. 5, *f*), що свідчить про можливість біологічного впливу на процес вивітрювання метеоритів у ґрунтового середовищі.

Нами виявлено морфологічне різноманіття екзогенних мінералів у від'ємних формах мікрорельєфу в метеоритних зразках. У вільному мікропросторі метеоритних зразків — у заглибленнях і мікропорожнинах, усередині зруйно-

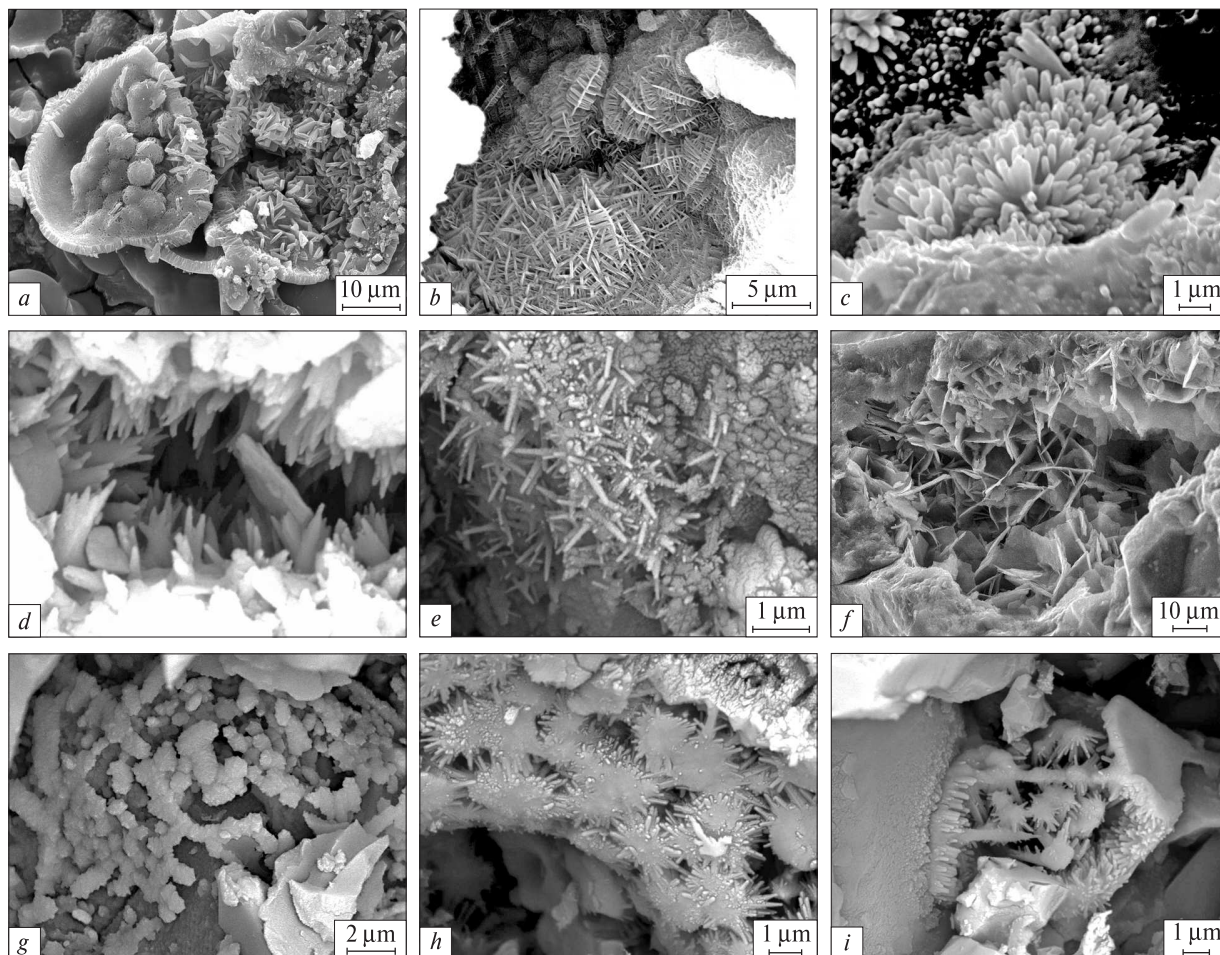


Рис. 6. Тонкі кристалічні агрегати гідроксидів заліза в метеоритних зразках. У зруйнованих сфероїдах: *a* — гроноподібні та пластинчасті агрегати, *b* — стрічкоподібні агрегати пластинчастих кристалів, *c* — розетки голчастопластинчастих кристалів оксигідроксидів Fe, металева пластинка з атакситу Чінге. У мікропорожнинах: *d* — тичкувато-голчасті агрегати продуктів вивітрювання на стінках порожнини, відкол хондрита Грузьке, *e* — шітки субмікроскопічних голчастих кристалів гетиту (?) в структурі дисперсної оксидної кірки по відколу хондрита Біла Церква, *f* — пластинчастий агрегат по олівину, паласит Омолон. Ажурні сітки-кірки: *g* — кірка з дископодібних агрегатів у заглибленні на поверхні відколу хондрита Біла Церква, *h* — сітка-кірка з променистих агрегатів голчастих кристалів гетиту (?), відкол хондрита Біла Церква, *i* — унікальна вторинна структура: тонкі кристалічні агрегати всередині порожнистого релікту зерна нікелістого заліза, відкол хондрита Біла Церква

Fig. 6. Fine crystalline aggregates of ferric hydroxides that formed in the meteorite samples. Fine crystals that occurred inside the *destroyed globules*: *a* — botryoidal and scaly crystals, *b* — band-shaped aggregates of the scaly crystals; *c* — rosette of the needle-shaped and scaly crystals; *a–c* — a (Fe-Ni)-metal plate from the Chinga iron meteorite. Fine-grained crystals that formed inside *the vesicles in the meteorite samples*: *d* — columned aggregates of the needle-shaped crystals, the split of the Gruz'ke chondrite; *e* — needle-shaped crystals aggregates, the split of the Bjelaja Zerkov chondrite, *f* — the aggregate of scaly crystals, the olivine grain surface, the Omolon pallasite. *Fine structure of the coating*: *g* — discal aggregates, *h* — radial needle-shaped crystals aggregates, *i* — unique fine crystalline aggregates within (Fe-Ni)-metal grain relict; *g–i* — the Bjelaja Zerkov chondrite splits

ваних мікросфероїдів, у міжзернових проміжках поширені такі кристалічні агрегати продуктів вивітрювання (рис. 6, *a–i*): а) мікродрузи та мікрошітки, складені з голчастих і пластинчастих кристалів; б) паралельнотичкуваті, паралельноволокнисті агрегати; в) унікальні ажурні агрегати як складні комбінації попередніх форм. Ці кристалічні форми про-

дуктів вивітрювання виникли внаслідок дії закону геометричного відбору [2, 16, 17] в мікропустотах і порах, на стінках мікросекрецій і тріщин у зразках метеоритів. У результаті різноманітного поєднання різнорозмірних (нано- і мікрометрових) зерен голчастої та пластинчастої форми утворились променисті, зірчасті, стрічкоподібні скупчення, ажурні сітки.

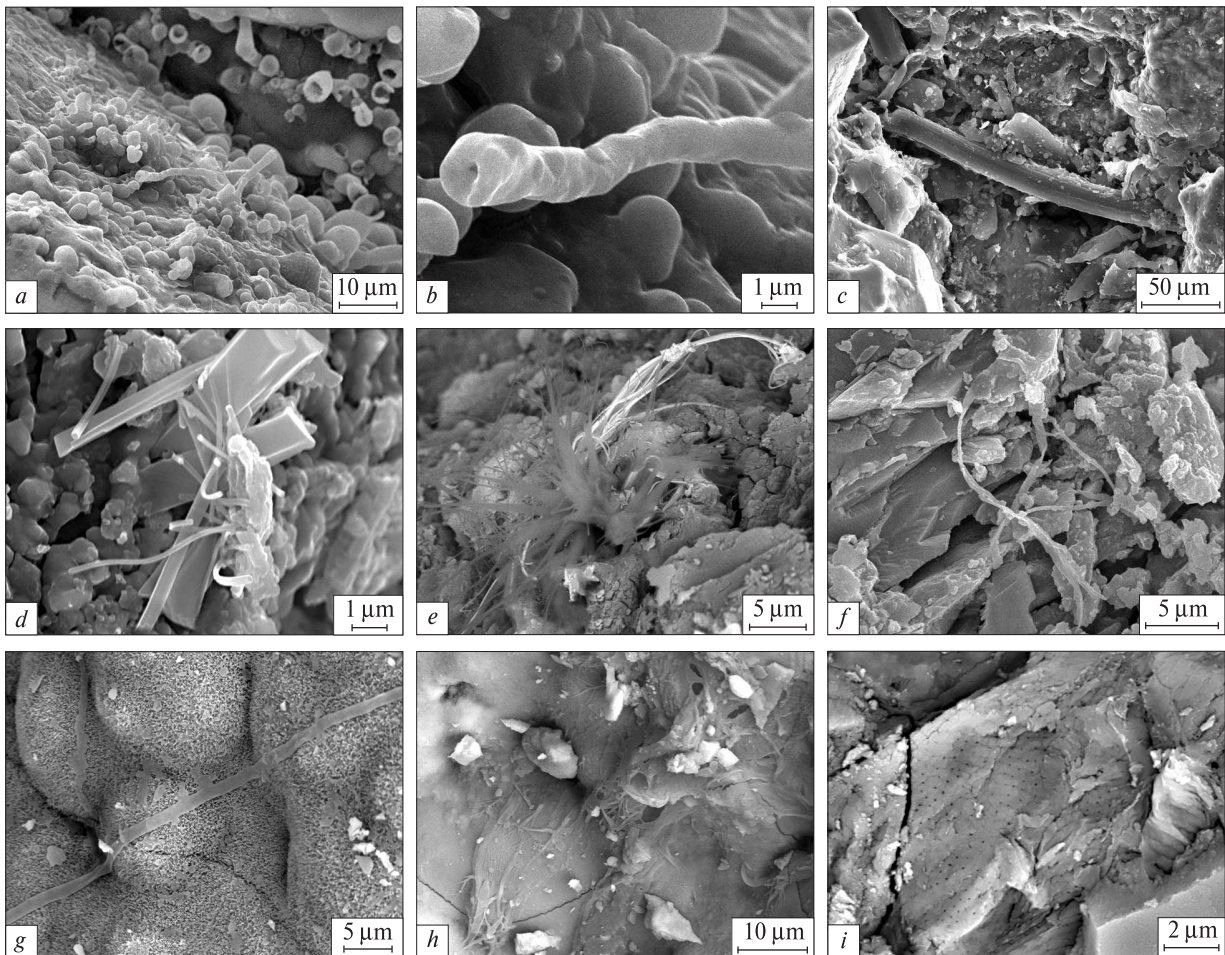


Рис. 7. Видовжений тип продуктів вивітрювання в метеоритах: *a* — асоціація об'єктів трубчастої, сталактитоподібної і циліндричної форм із мікросфероїдами; *b, c* — відповідно, закриті і порожнисте трубчасті утворення; *d* — агрегат видовжених евгедральних та деформованих ниткоподібних кристалів рабдиту (?) в корозійній кірці по зерну ОІ, паласит Брагін; *e–g* — нитко- і ламелеподібні утворення; *h, i* — неідентифіковані об'єкти складної форми: *h* — дендритоподібний, *i* — шаруватий з регулярно розташованими порами. Відколи хондритів Кулішівка (*a*), Біла Церква (*b, c*), Грузьке (*e–i*)

Fig. 7. Elongated type of the terrestrial weathering products in meteorites: *a* — the tubular, stalactite-shaped and spherical objects, the Kuleshovka chondrite split; *b* — tubular shape, *c* — hollow tube, the Bjelaja Zerkov chondrite split; *d* — elongated and strained rhabdite (?) crystals in the corrosive coating, ОI grain, Brahin pallasite; *e–g* — filamentous and lamellar objects; *h, i* — unidentified objects of the irregular shape, *e–i* — the Gruz'ke meteorite splits

Вперше на поверхні відколу хондрита Біла Церква нами знайдені рідкісні порожнисті релікти ідіоморфних мікрометрових зерен (Fe, Ni)-металу, внутрішній простір яких був заповнений мікросітками, паралельнотичкуватими та променистими агрегатами (рис. 6, *i*). Спостережено паралельноволокнисту будову гідроксидних жилок як на поверхні відколів, так і всередині (в аншліфах) хондритів, наприклад, у зерні троїліту з хондрита Грузьке (рис. 3, *b*).

Відмічено наростання агрегатів голчастих нанокристалів екзогенних мінералів на поверхні мікрометрових зерен, сфероїдальних

об'єктів, мікрокірок. Зазначалось, що нанометрові розміри кристалів забезпечують їх підвищену адсорбційну здатність, що сприяє подальшому окисненню метеоритної речовини в земних умовах [9, 31]. Менш поширеними є орієнтовані наростання пластинок полігональних мікрокристалів, імовірно, гематиту та їх агрегатів, а також дископодібних мікропластинок нез'ясованого складу на поверхні відколів хондритів.

Асоціації морфологічних різновидів продуктів вивітрювання в метеоритах свідчать про нерівномірне вивітрювання метеоритної речовини в цілому та металевої фази зокрема, а також

про трансформацію нестійких фаз оксигідроксидів Fe залежно від умов середовища екзогенного мінералоутворення [1].

3. *Видовжений тип*: а) натічні сталактитоподібні та трубчасті утворення (рис. 7, *a–c*); б) нитко- і ламелеподібні утворення (рис. 7, *d–g*); в) неідентифіковані об'єкти складної форми (рис. 7, *h, i*).

Мікросталактити і трубчасті утворення наявні на поверхні метеоритів серед продуктів вивітрювання як окремі об'єкти або є структурною складовою ("гілками") екзотичних "космічних рослин". До трубчастих також належать відкриті об'єкти циліндричної форми і блокової будови, які є подібними до трубчастих мембранних утворень [16].

Скупчення ламелеподібних і трубчастих утворень нез'ясованого походження були знайдені на окисненій поверхні хондритів Бердянськ, Грузьке, Біла Церква, на зернах олівіну з паласиту. Так, у корозійній кірці по зерну олівіну з паласиту Брагін (рис. 7, *d*) нами виявлено агрегат видовжених евгедральних і ниткоподібних деформованих кристалів, які, можливо, є рабдитом. Але, як правило, цей фосфід асоціює із зернами нікелістого заліза, що, наприклад, спостерігалось в енстатитовому хондриті Піліствере і залізних метеоритах Каалі, Мар'їнка, Сіхоте-Алінь із метеоритної колекції ННПМ НАН України [12].

Нитко- і ламелеподібні утворення та об'єкти складної форми (рис. 7, *e–i*) знаходилися переважно у зразках метеоритів-знахідок і в одному метеориті-падінні. Вони належать, найімовірніше, до продуктів біологічного вивітрювання, пов'язаних із життєдіяльністю мікроорганізмів — різних видів бактерій, зокрема залізобактерій, що спричиняють біокорозію метеоритного (Fe, Ni)-металу [18, 24, 26, 33], а також решток макроорганізмів рослинного походження (рис. 7, *h, i*), які разом із мікроспорами (рис. 5, *e, f*) брали участь у деструкції метеоритних зразків.

Виявлені нами значні варіації вмісту Fe і Ni у продуктах вивітрювання нікелістого заліза з атакситу Чінге та звичайних хондритів вказують на нерівномірний характер корозії метеоритного металу — переважно за рахунок менш стійких камаситу і плеситу, тоді як теніт залишався майже незмінним. Збагаченість екзогенних мінеральних фаз S, Si, Mg, Al, Cl є ознакою міграції елементів шляхом дифузії по мікропорах і мікротріщинах у метеоритах, про

що також повідомляли інші дослідники [17].

Отже, куляста форма агрегатів із вмістом до 3–5 % Cl свідчить про виникнення агресивної корозійної фази Cl-вмісного акаганейту в процесі окиснення метеоритного (Fe, Ni)-металу (наприклад, в атакситі Чінге), що необхідно враховувати під час зберігання метеоритних зразків, особливо залізних метеоритів, у лабораторіях і музейних колекціях.

По аналогії із тим фактом, що знайдені в продуктах корозії археологічного заліза інертні фази гідроксидів заліза виконують захисну дію [25], вважаємо, що фази гетиту і маггеміту, які діагностовано нами за допомогою методів ЯГР та РФА у продуктах вивітрювання із залізних метеоритів Сіхоте-Алінь і Чінге [3], сприятимуть довготривалому збереженню зразків цих метеоритів. Термодинамічно стійка структура гетиту в поєднанні із тонкою дисперсністю забезпечують хороші захисні властивості цієї фази в зразках залізних метеоритів.

Висновки. У роботі узагальнено дані, отримані в результаті вивчення морфології продуктів вивітрювання у зразках метеоритів із колекції ННПМ НАН України. Морфологічне різноманіття вторинних мінеральних фаз пов'язане головним чином із атмосферою, а також ґрунтовою корозією зерен нікелістого заліза, в меншій мірі троїліту, в процесі хімічного і, можливо, мікробіологічного вивітрювання метеоритів, особливо метеоритних знахідок. Найбільш поширеними екзогенними мінералами метеоритів є оксиди і оксигідроксиди заліза, менш розповсюджені вторинні сульфідні — пірит і Cu-вмісний сульфід.

Запропоновано морфологічну класифікацію продуктів вивітрювання та контамінації в метеоритних зразках, які уперше поділено на три морфологічні типи: площинний, ізометричний та видовжений. Перші два типи більше поширені.

Площинний тип характеризує просторове розміщення і морфологію вторинних мінеральних фаз у метеоритних зразках та відображає поверхневе та проникне вивітрювання метеоритної речовини. Ізометричний і видовжений типи характеризують значною мірою особливості морфології кристалічних агрегатів екзогенних мінералів, що утворились на поверхні метеоритних зразків.

Екзогенне кристалоутворення переважно реалізується у нано- і мікрометровому діапазоні, у мікропорах — заглибленнях, пустотах,

порах, міжзернових проміжках, на стінках тришин. Уперше на поверхні відколу хондрита Біла Церква знайдені рідкісні порожнисті релікти ідіоморфних мікрометрових зерен нікелістого заліза, заповнених тонкими кристалічними агрегатами продуктів вивітрювання.

Присутність фази тонкодисперсного гетиту сприяє збереженню метеоритних зразків. Наявність найбільш агресивної корозійної фази СІ-вмісного акаганейту, на що вказує куляста форма агрегатів із підвищеним вмістом хлору до 3–5 %, свідчить про активну корозію (Fe, Ni)-металу, що необхідно враховувати під час зберігання метеоритних зразків, особливо залізних метеоритів у лабораторіях і музейних колекціях.

Таким чином, встановлене нами морфологічне різноманіття продуктів вивітрювання в зразках метеоритів із колекції ННПМ НАН Украї-

ни обумовлено в основному послідовним окисненням нікелістого заліза, меншою мірою — троїліту. Тонкі морфологічні особливості фаз оксидів-оксигідроксидів Fe відображають різний ступінь корозії (Fe, Ni)-металу та нерівномірне вивітрювання метеоритів, що вказує на зміну локальних умов середовища екзогенного фазоутворення в процесі поступової руйнації метеоритної речовини в земних умовах.

Висловлюю щиру подяку д-ру геол.-мінерал. наук, проф. В.П. Семененко (ІГМР НАН України) за цінні наукові консультації та поради у ході підготовки статті; В.М. Сливінському (ДУ "ІГНС НАН України"), В.В. Пермякову (ІГН НАН України) та зав. лабораторією електронної мікроскопії, д-ру біол. наук Д.О. Клімчуку (Ін-т ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України) за технічну допомогу у проведенні СЕМ дослідження.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Гипергенные* окислы железа в геологических процессах / Отв. ред. Н.В. Петровская. — М. : Наука, 1975. — 207 с.
2. Григорьев Д.П. Онтогенез минералов. — Львов : Изд-во Львов. гос. ун-та, 1961. — 284 с.
3. Іваницький В.П., Ширінбекова С.Н., Гречановська О.Є., Польшин Е.В. Склад продуктів земного вивітрювання залізних метеоритів Сіхоте-Алінь і Чінге за даними мессбауєрівської спектроскопії та рентгенофазового аналізу // Мінерал. журн. — 2014. — 36, № 4. — С. 66–76.
4. Кичань Н.В., Ширінбекова С.Н., Сливінський В.М. Структурно-мінералогічні особливості нікелістого заліза метеорита Галків // Зап. Укр. мінерал. т-ва. — 2009. — 6. — С. 70–76.
5. Кичань Н.В., Ширінбекова С.Н. Особливості структур ударного метаморфізму та звітрювання метеорита Біла Церква // Мінерал. зб. Львів. ун-ту. — 2012. — № 62, вип. 2. — С. 102–110.
6. Семененко В.П., Гирич А.Л. Природа екзотических объектов в метеоритах // Минерал. журн. — 1996. — 18, № 6. — С. 14–21.
7. Семененко В.П., Гіріч А.Л., Русько Ю.О. Каталог метеоритів, що зберігаються в Національному науково-природничому музеї НАН України (на 1 січня 2007 р.) // Мінерал. журн. — 2007. — 29, № 2. — С. 72–82.
8. Семененко В.П., Гіріч А.Л., Кичань Н.В., Ширінбекова С.Н. Структурно-мінералогічні особливості кам'яного метеориту Грузьке // Мінерал. зб. Львів. ун-ту. — 2010. — № 60, вип. 1. — С. 59–69.
9. Семененко В.П., Гирич А.Л., Ширинбекова С.Н., Кичань Н.В., Горovenko Т.Н. Генетические типы нанометровых зерен минералов в метеоритах // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. — 2012. — 10, № 1. — С. 1–10.
10. Семененко В.П., Квасниця І.В., Алексеева О.І., Ширінбекова С.Н. Особливості скульптури поверхні зерен мінералів у паласитах // Зап. Укр. мінерал. т-ва. — 2008. — 5. — С. 68–74.
11. Семененко В.П., Самойлович Л.Г., Егорова Л.Н., Козлов И.С. Состав и строение фаз никелистого железа в атакситах Чинге // Метеоритика. — 1982. — Вып. 41. — С. 93–95.
12. Соботович Э.В., Семененко В.П. Вещество метеоритов. — Киев : Наук. думка, 1984. — 191 с.
13. Соботович Э.В., Семененко В.П. Происхождение метеоритов. — Киев : Наук. думка, 1985. — 207 с.
14. Ширінбекова С.Н. Порівняльна характеристика ступеня вивітрювання хондритів з метеоритної колекції Національного науково-природничого музею НАН України // Зап. Укр. мінерал. т-ва. — 2008. — 5. — С. 96–104.
15. Ширінбекова С.Н., Семененко В.П. Особливості селективного вивітрювання атакситу Чінге // Зап. Укр. мінерал. т-ва. — 2006. — 3. — С. 196–199.
16. Чухров Ф.В. Коллоиды в земной коре. — М. : Изд-во АН СССР, 1955. — 671 с.
17. Юдин И.А., Коломенский В.Д. Минералогия метеоритов. — Свердловск : УНЦ АН СССР, 1987. — 200 с.
18. Benzerara K., Charon V., Moreira D., López-García P., Guyot F., Heulin Th. Microbial diversity on the Tatahouine meteorite // Meteoritics and Planet. Sci. — 2006. — 41, No 8. — P. 1–17.
19. Bland P.A., Kelley S.P., Berry F.J., Cadogan J.M., Pillinger C.T. Artificial weathering of the ordinary chondrite Allegan: Implications for the presence of Cl⁻ as a structural component of akaganeite // Amer. Miner. — 1997. — 82. — P. 1187–1197.
20. Bland P.A., Zolensky M.E., Benedix G.K., Sephton M.A. Weathering of Chondritic Meteorites // Meteorites and the Early Solar System II. — Univ. Arizona Press, 2006. — P. 853–867.

21. Buchwald V.F., Clarke R.S. Akaganeite, not lawrencite, corrodes Antarctic iron meteorites // *Meteoritics*. — 1988. — **23**, No 3. — P. 261.
22. Buchwald V.F., Clarke R.S. Corrosion of Fe-Ni alloys by Cl-containing akaganeite (β -FeOOH): The Antarctic meteorite case // *Amer. Miner.* — 1989. — **74**. — P. 656–667.
23. Grokhovsky V.I., Mamaev I.A., Milder O.B., Oshtrakh M.I. Weathering and corrosion of iron meteorites studied by Mossbauer spectroscopy // *Meteoritics and Planet. Sci. Suppl.* — 2002. — **37**. — P. A56.
24. Gronstal A., Pearson V., Kappler A., Dooris C., Anand M., Poitrasson F., Kee T.P., Cockell C.S. Laboratory experiments on the weathering of iron meteorites and carbonaceous chondrites by iron-oxidizing bacteria // *Meteoritics and Planet. Sci.* — 2009. — **44**, No 2. — P. 233–247.
25. Jegdić B., Polić-Radovanović S., Ristić S., Alil A. Corrosion of archaeological artefact made of forged iron // *Metallurgical and Materials Engineering*. — 2012. — **18**, Is. 3. — P. 233–240.
26. Klinova S.V., Yakovlev G.A., Firsov N.N., Grokhovsky V.I. Microbiological influence of phototrophic bacteria on meteorites in vitro // *Meteoritics and Planet. Sci.* — 2015. — **50**. — P. 5210.
27. Lee M.R., Bland P.A., Graham G. Preparation of TEM samples by focused ion beam (FIB) techniques: Applications to the study of clays and phyllosilicates in meteorites // *Miner. Mag.* — 2003. — **67**. — P. 581–592.
28. Lee M.R., Smith C.L., Gordon S.H., Hodson M.E. Laboratory simulation of terrestrial meteorite weathering using the Bensour (LL6) ordinary chondrite // *Meteoritics and Planet. Sci.* — 2008. — **41**, No 8. — P. 1123–1138.
29. Mamaev I.A., Milder O.B., Grokhovsky V.I., Oshtrakh M.I. Mössbauer effect study of the weathering and corrosion products of Sikhote-Alin and Chinga meteorites // *Lunar and Planet. Sci. XXXIII*, 11-15 Mar. 2002; Houston, TX, US, — 2002. — P. 1608.
30. Rubin A.E. Mineralogy of meteorite groups // *Meteoritics*. — 1997. — **32**. — P. 231–247.
31. Semenenko V.P., Girich A.L., Shkurenko K.O., Kychan N.V., Shyrinbekova S.N., Gorovenko T.M. Nanometer-sized mineral grains and their genetic types in meteorites // *Meteorites*. — 2011. — **1**, No 1. — P. 13–19.
32. Wlotzka F. A weathering scale for the ordinary chondrites // *Meteoritics*. — 1993. — **28**. — P. 460.
33. Yakovlev G.A., Grokhovsky V.I., Firsov N.N., Voropaeva O.V. The structure evolution under climatic and microbial terrestrial conditions // *Meteoritics and Planet. Sci.* — 2013. — **48**. — P. 5292.

Надійшла 30.12.2015

REFERENCES

1. Petrovskaya, N.V. (ed.) (1975), *Gipergennyie okisly zheleza v geologicheskikh processah*, Nauka, Moscow, 207 p.
2. Grigor'ev, D.P. (1961), *Ontogeniya mineralov*, Izd-vo L'vov. un-ta, L'vov, Ukraine, 284 p.
3. Ivanitskiy, V.P., Shyrinbekova, S.N., Grechanovskaya, O.Ye. and Polshin, E.V. (2014), *Mineral. Journ. (Ukraine)*, Kyiv, Vol. 36 No 4, pp. 66-76.
4. Kychan, N.V., Shyrinbekova, S.N. and Slivins'kyi, V.M. (2009), *Zap. Ukr. mineral. tov.*, Kyiv, Ukraine, Vol. 6, pp. 70-76.
5. Kychan, N.V. and Shyrinbekova, S.N. (2012), *Mineral. zb. L'viv. un-tu*, L'viv, Ukraine, No 62 Vyp. 2, pp. 102-110.
6. Semenenko, V.P. and Girich, A.L. (1996), *Mineral. Journ. (Ukraine)*, Kyiv, Vol. 18 No 6. pp. 14-21.
7. Semenenko, V.P., Girich, A.L. and Rus'ko, Ju.O. (2007), *Mineral. Journ. (Ukraine)*, Kyiv, Vol. 29 No 2, pp. 72-82.
8. Semenenko, V.P., Girich, A.L., Kychan, N.V. and Shyrinbekova, S.N. (2010), *Mineral. zb. L'viv. un-tu*, No 60 Vyp. 1, Ukraine, pp. 59-69.
9. Semenenko, V.P., Girich, A.L., Shyrinbekova, S.N., Kychan, N.V. and Gorovenko, T.N. (2012), *Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies*, Kyiv, Ukraine, Vol. 10 No 1, pp. 1-10.
10. Semenenko, V.P., Kvasnytsya, I.V., Alekseeva, O.I. and Shyrinbekova, S.N. (2008), *Zap. Ukr. mineral. tov.*, Kyiv, Ukraine, Vol. 5, pp. 68-74.
11. Semenenko, V.P., Samoiloich, L.G., Egorova, L.N. and Kozlov, I.S. (1982), *Meteoritika*, Vyp. 41, pp. 93-95.
12. Sobotovich, E.V. and Semenenko, V.P. (1984), *Veschestvo meteoritov*, Naukova dumka, Kyiv, 191 p.
13. Sobotovich, E.V. and Semenenko, V.P. (1985), *Proiskhozhdenie meteoritov*, Naukova dumka, Kyiv, 207 p.
14. Shyrinbekova S.N. (2008), *Zap. Ukr. mineral. tov.*, Kyiv, Ukraine, Vol. 5, pp. 96-104.
15. Shyrinbekova, S.N. and Semenenko, V.P. (2006), *Zap. Ukr. mineral. tov.*, Kyiv, Ukraine, Vol. 3, pp. 196-199.
16. Chukhrov, F.V. (1955), *Kolloidy v zemnoi kore*, Izd-vo AN SSSR, Moscow, 671 p.
17. Yudin, I.A. and Kolomenskiy, V.D. (1987), *Mineralogija meteoritov*, UNC AN SSSR, Sverdlovsk, 200 p.
18. Benzerara, K., Chapon, V., Moreira, D., López-García, P., Guyoti, F. and Heulin, Th. (2006), *Meteoritics and Planet. Sci.*, Vol. 41 No 8, pp. 1-17.
19. Bland, P.A., Kelley, S.P., Berry, F.J., Cadogan, J.M. and Pillinger, C.T. (1997), *Amer. Miner.*, Vol. 82, pp. 1187-1197.
20. Bland, P.A., Zolensky, M.E., Benedix, G.K. and Sephton, M.A. (2006), *Meteorites and the Early Solar System II*, Univ. of Arizona Press, pp. 853-867.
21. Buchwald, V.F. and Clarke, R.S. (1988), *Meteoritics*, Vol. 23 No 3, p. 261.
22. Buchwald, V.F. and Clarke, R.S. (1989), *Amer. Miner.*, Vol. 74, pp. 656-667.
23. Grokhovsky, V.I., Mamaev, I.A., Milder, O.B. and Oshtrakh, M.I. (2002), *Meteoritics and Planet. Sci., Suppl.*, Vol. 37, p. A56.
24. Gronstal, A., Pearson, V., Kappler, A., Dooris, C., Anand, M., Poitrasson, F., Kee, T.P. and Cockell, C.S. (2009), *Meteoritics and Planet. Sci.*, Vol. 44 No 2, pp. 233-247.

25. Jegdić, B., Polić-Radovanović, S., Ristić, S. and Alil, A. (2012), *Metallurgical and Materials Engineering*, Vol. 18 Is. 3, pp. 233-240.
26. Klinova, S.V., Yakovlev, G.A., Firsov, N.N. and Grokhovsky, V.I. (2015), *Meteoritics and Planet. Sci.*, Vol. 50, p. 5210.
27. Lee, M.R., Bland, P.A. and Graham, G. (2003), *Miner. Mag.*, Vol. 67, pp. 581-592.
28. Lee, M.R., Smith, C.L., Gordon, S.H. and Hodson, M.E. (2008), *Meteoritics and Planet. Sci.*, Vol. 41 No 8, pp. 1123-1138.
29. Mamaev, I.A., Milder, O.B., Grokhovsky, V.I. and Oshtrakh, M.I. (2002), *Lunar and Planet. Sci.* XXXIII, p. 1608.
30. Rubin, A.E. (1997), *Meteoritics*, Vol. 32, pp. 231-247.
31. Semenenko, V.P., Girich, A.L., Shkurenko, K.O., Kychan, N.V., Shyrinbekova, S.N. and Gorovenko, T.M. (2011), *Meteorites*, Vol. 1 No 1, pp. 13-19.
32. Wlotzka, F. (1993), *Meteoritics*, Vol. 28, p. 460.
33. Yakovlev, G.A., Grokhovsky, V.I., Firsov, N.N. and Voropaeva, O.V. (2013), *Meteoritics and Planet. Sci.*, Vol. 48, p. 5292.

Received 30.12.2015

С.Н. Ширинбекова

Институт геохимии, минералогии и рудообразования
им. Н.П. Семеновко НАН Украины
03680, г. Киев-142, Украина, пр. Акад. Палладина, 34
E-mail: cosmin@ua

ТОНКИЕ МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОДУКТОВ ЗЕМНОГО ВЫВЕТРИВАНИЯ В МЕТЕОРИТАХ

Представлены обобщенные данные об особенностях морфологии продуктов земного выветривания в образцах метеоритов из коллекции Национального научно-природоведческого музея НАН Украины. Предложена морфологическая классификация продуктов выветривания метеоритов. Впервые выделено три типа продуктов выветривания: плоскостной, изометричный и удлинённый, характеризующие пространственное размещение и морфологические особенности экзогенных минералов в образцах метеоритов. Продукты выветривания генетически связаны преимущественно с никелистым железом (Fe, Ni), структурная и фазовая неоднородность которого обусловили избирательное окисление камасита α -(Fe, Ni) и неравномерное выветривание метеоритных образцов. Основные экзогенные минералы метеоритов — оксиды и оксигидроксиды железа; менее распространены вторичные сульфиды — фрамбоидный пирит и Cu-содержащий сульфид, образовавшиеся в процессе выветривания троилита и, возможно, самородной меди. Присутствие сфероидальных агрегатов Cl-содержащего акаганеита с содержанием до 3—5 % Cl указывает на активную коррозию (Fe, Ni)-металла в образцах метеоритов-находок, что необходимо учитывать при хранении метеоритного вещества в лабораториях и музейных коллекциях.

Ключевые слова: метеориты, продукты земного выветривания, акаганеит, гетит, морфологическая классификация.

S.N. Shyrinbekova

M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy
and Ore Formation of the NAS of Ukraine
34, Acad. Palladina Pr., Kyiv-142, Ukraine, 03680
E-mail: cosmin@ua

FINE MORPHOLOGICAL FEATURES OF THE TERRESTRIAL WEATHERING PRODUCTS IN METEORITES

The summarized data on the morphology of terrestrial weathering products in the meteorite samples from the meteorite collection of the National Museum of Natural History of the NAS of Ukraine have been presented. The morphological classification of terrestrial weathering products in meteorite samples was proposed. Three morphological types of weathering products were classified for the first time — complanate, isometric and elongated, that characterize the spatial distribution and morphological characteristics of secondary minerals in meteorites. The corrosion and terrestrial weathering products are mainly associated with Fe-Ni metal in the uneven weathered meteorite samples. Secondary minerals are formed by predominant corrosion of α -(Fe-Ni) metal due to the phase and structure inhomogeneity of the meteoritic Fe-Ni alloy. The widely distributed secondary minerals in meteorites are iron oxides and hydroxides — goethite, limonite, lepidocrocite, maghemite and Cl-containing akaganéite. The minor secondary sulfides are framboidal pyrite and Cu-sulfide that were formed by weathering of troilite and possibly native copper. The presence of spherical aggregates of akaganéite containing up to 3—5 % Cl indicates the active corrosion of Fe-Ni metal in the samples of meteorite finds. This fact should be taken into account when storing meteoritic matter in the laboratory and meteorite collection in museums.

Keywords: meteorites, terrestrial weathering products, goethite, akaganéite, morphological classification.