

ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА СТУПЕНЯ ВИВІТРЮВАННЯ ХОНДРИТІВ З МЕТЕОРИТНОЇ КОЛЕКЦІЇ НАЦІОНАЛЬНОГО НАУКОВО-ПРИРОДНИЧОГО МУЗЕЮ НАН УКРАЇНИ

Наведено результати оптично-мікроскопічного, електронно-мікроскопічного і рентгеноспектрального вивчення продуктів земного вивітрювання 26 хондритів різних хімічних груп і петрологічних типів із метеоритної колекції Національного науково-природничого музею НАН України. Показано, що колоїдний стан гідроксидів заліза, які є найранішими продуктами вивітрювання метеоритів і мають високі сорбційні властивості, зумовлює подальше інтенсивне руйнування метеоритів. Відзначено необхідність підтримання оптимального рівня вологості та чистоти повітря у музейних умовах для збереження метеоритів.

Вступ. На земній поверхні за умов окиснювального і водовмісного середовища метеорити усіх типів підпадають під дію фізичного, хімічного та біологічного вивітрювання. Характер вивітрювання метеоритів подібний до гіпергенних змін ультраосновних порід [19], а швидкість руйнації залежить від внутрішніх і зовнішніх чинників та земного віку метеоритів.

До внутрішніх чинників належать:

- фізичні та макроскопічні характеристики метеорита: а) форма та розмір зразків: чим більшою є активна поверхня об'єкта, тим вищий ступінь його руйнування; б) наявність кори плавлення, яка виконує захисну дію; в) цілісність зразка: наявність тріщин і свіжих сколів, роздробленість, злущення оксидних кірок, що прискорює фізичне та хімічне вивітрювання зразків;

- будова і мінеральний склад: неоднорідність будови, пористість, полімінеральність, наявність нікелістого заліза та троїліту, які серед космічних мінералів є найчутливішими до окиснення в земних умовах [21]; наявність різних за структурою камаситових і тенітових зерен, утворення ними гальванічних пар значно знижує стійкість металевих зерен до процесів окиснення;

- хіміко-петрологічні особливості – рівноважний чи нерівноважний характер метеоритної речовини. Нерівноважні метеорити вивітрюються швидше, ніж рівноважні [19].

Зовнішні чинники вивітрювання – кліматичні умови та обставини знаходження метеоритів (знахідка чи падіння), а також умови збереження у музеях.

Найінтенсивніше процеси вивітрювання проходять за умов вологого клімату з високими або помірними температурами [6, 7, 20, 26]. Тут відбуваються процеси лімоні-

тизації, карбонатизації, в спекотних умовах – також фосфатизації, в помірних – каолінізації; процеси йдуть як із привнесенням, так із винесенням речовини [1, 16–19].

Вивітрювання кам'яних метеоритів зумовлене хімічним вивітрюванням нікелістого заліза і троїліту, внаслідок чого відбувається механічна руйнація зразків [2]. Для метеоритів-знахідок важливими чинниками вивітрювання є фізико-хімічні властивості ґрунтових розчинів, які визначають співвідношення параметрів pH і Eh середовища знаходження, що впливає на міграцію та осадження акцесорних елементів, зокрема заліза і нікелю [4]. Незалежно від умов збереження на Землі фактор часу завжди сприяє деградації метеоритів.

Екзогенні зміни доземних непрозорих мінералів метеоритів призводять до їх поступового заміщення на оксиди-гідроксиди заліза і нікелю, а саме до утворення бунзеніту NiO, маггеміту γ -Fe₂O₃, Ni-маггеміту γ -(Fe, Ni)₂O₃, гематиту α -Fe₂O₃, магнетиту FeFe₂O₄, тревориту NiFe₂O₄, гетиту α -FeO(OH), акаганеїту β -FeO(OH,Cl), лепідокрокіту γ -FeO(OH,Cl), голандиту (Fe₁₅Ni) × × (O₁₂(OH)₂₀)Cl(OH)₂, феригідриту 5Fe₂O₃ · 9H₂O [13, 22, 23, 25]. Троїліт заміщується на пентландит, що з часом переходить у гетит і лепідокрокіт, подібно до змін земних сульфідів в окиснювальному середовищі [8].

У шкалі вивітрювання звичайних хондритів [27] запропоновано сім стадій (W0–W6) окиснення. Вивітрювання починається із зерен металу, потім троїліту, останніми заміщуються силікати. Результатом вивітрювання є повне окиснення метеорита із втратою первинних структурно-мінералогічних особливостей. Значний ступінь екзогенної переробки знижує інформативність метеоритної речовини для коректної інтерпретації доземної історії метеоритів. Стадії вивітрювання пов'язані також із земним віком метеоритів.

Електронно-мікроскопічними дослідженнями [9] поверхні сколів звичайних хондритів встановлено морфологічні особливості та три стадії розвитку в них земних гідроксидів заліза. Автори показали, що на першій стадії вивітрювання формуються агресивні колоїдні утворення, поступова розкристалізація яких завершується формуванням Cl-вмісного акаганеїту, виділенням HCl та ланцюговою реакцією подальшого окиснення металу і троїліту в хондритах.

Мета дослідження: на основі оптично-, електронно-мікроскопічного і рентгеноспектрального дослідження встановити стадію вивітрювання хондритів із колекції Національного науково-природничого музею (ННПМ) НАН України, зіставити їх у межах груп, між групами і визначити основні чинники, що сприяють найбільшому вивітрюванню речовини метеоритів за даних кліматичних умов.

Загальну оптично-мікроскопічну характеристику продуктів земного вивітрювання в більшості метеоритів України наведено у праці [12].

Об'єкти і методи дослідження. Досліджено 26 хондритів різних хімічних груп і петрологічних типів із колекції ННПМ НАН України, а саме (в дужках – петрологічний тип): LL-група – Кримка (3), Савченське (4), Окніни (5), Вавилівка (6), Жигайлівка (6); L-група – Андріївка (3–4), Саратов (4), Бердянськ (5), Оленівка (5), Княгиня (5), Довга Воля (5–6), Грослібенталь (6), Забориця (6), Кукшин (6), Кулішівка (6), Леонівка (6), Мордвинівка (6); H-група – Вілокриниччя (4), Галків (4), Горлівка (4), Одеса (4), Олександрівський Хутір (4), Біла Церква (5), Жовтневий Хутір (5), Дзвінкове (5); E-група – Піліствере (6).

Крім хондритів Бердянськ і Одеса, які є знахідками, усі інші метеорити належать до падінь. Метеорити знаходились в умовах помірного клімату території України, а також Росії (хондрит Саратов), Естонії (хондрит Піліствере). Хондрит Бердянськ був знайдений археологами у 1843 р. під час розкопок скіфського кургану, в якому пролежав 2000 років. Зразок метеорита Одеса був знайдений у 1960 р. на околиці м. Одеса.

Оптично-мікроскопічні дослідження проведено у прохідному і відбитому світлі мікроскопів МИН-8 та ПОЛАМ Р-312. Сканувальне електронно-мікроскопічне вивчення поверхні відколів зразків хондритів Оленівка, Кулішівка, Жовтневий Хутір здійснено за допомогою сканувальних електронних мікроскопів JEOL JSM-6060LA (Інститут ботаніки НАН України) та JEOL JSM-6490LV (Інститут геохімії навколишнього середовища НАН та МНС України). У хондритах Бердянськ та Мордвинівка хімічний склад доземних мінералів і утворених у процесі їх земного вивітрювання вторинних мінералів визначено на рентгенівському мікроаналізаторі JEOL JXA-5 (Інститут геохімії, мінералогії та рудотворення НАН України); вимірювання проводили за прискорювальної напруги 25 кВ, сили струму 35 мкА, діаметра пучка зонда 7 мкм.

Результати досліджень. Відповідно до шкали вивітрювання [27], більшість досліджених метеоритів зазнали незначного екзогенного впливу в межах стадій W0-2 (див. таблицю). У цілому метеорити вивітрюються нерівномірно, що зумовлено їх текстурними особливостями.

На початку вивітрювання (стадія W0) гідроксиди частково розвиваються по периферії незначної кількості (5-15 %) зерен камаситу та плеситу. На стадії W1 процес окиснення поширений по периферії 15-30 % металевих і троїлітових зерен, а також по тріщинах у них. Гідроксидні оболонки мають концентрично-зональну будову: центральна зона світло-сіра, периферійні – коричневаті-сірі. На цій стадії у матриці вже наявні суцільно заміщені дрібні зерна неправильної форми. Гідроксиди розвиваються також по міжзернових проміжках, тріщинах у силікатах. На стадії W1-2 екзогенний вплив позначився на уламках хондр і тріщинах у середині хондр, які мають включення окиснених непрозорих зерен. На стадії W2-3 ознаки вивітрювання видно на більшій частині площі досліджених зразків. У матриці розвинуті численні гідроксидні жилки. У хондрах екзогенне заміщення проявлено по периферійних ділянках, тріщинах, межах зерен.

У найбільш змінених (стадії W3-4) метеоритах, що належать до знахідок, процесом суттєвих екзогенних перетворень охоплені всі текстурні одиниці: матриця, уламки хондр та хондри. Вивітрювання поширюється суцільним фронтом. Матрицю пронизано потужними (завтовшки до 100 мкм) жилами екзогенного наповнення. По метеоритних непрозорих мінералах утворюються псевдоморфози, складені сумішшю оксидів-гідроксидів заліза сірого кольору зі світлими, коричневатими та синюватими відтінками, що засвідчує хімічну неоднорідність заміщеної речовини.

Серед п'яти представників LL-групи найбільш вивітреною є речовина хондрита Кримка, решта метеоритів знаходиться на першій стадії вивітрювання (див. таблицю). У майже незміненому хондриті Вавилівка силікати навколо непрозорих зерен лишаються не окисненими.

Як спостерігали раніше [12], на поверхні зразків метеорита Кримка нерівномірно розвинуті бурі плями гідроксидів заліза. В оптичному мікроскопі видно, що процесом окиснення охоплено значну частину зерен троїліту, меншою мірою нікелістого заліза. У полікристалах троїліту гідроксиди розвинуті по сіточці тріщин, навколо частини металевих зерен утворились екзогенні оболонки. Гіпідіоморфні зерна нікелістого заліза залишилися незміненими. В матриці та хондрах побуріння силікатів локалізовано навколо окиснених металевих зерен. У дрібнозернистих ділянках матриці розвинуті численні гідроксидні жилки.

Із 12 метеоритів L-групи значного земного впливу зазнали хондрити Мордвинівка, Саратов та, особливо, Бердянськ – найбільш вивітрений метеорит ко-

Порівняльна характеристика ступеня вивітрювання хондритів

лекції. У дослідженні [12] зазначено, що внаслідок істотних екзогенних змін суттєво знизилась генетична значущість структурно-мінералогічних, хімічних і фізичних характеристик цього метеорита.

Так, у метеориті Бердянськ усі металеві зерна вивітрени по-різному. Більш окисненими є камасит та плесит, навколо теніту утворилися вторинні оболонки. Основний непрозорий мінерал – троїліт – досить катаклазований, проте менш змінений – по тріщинах та периферії, також відзначається заміщення зсередини. Поодинокі зерна хроміту частково окиснені з периферії, по тріщинах усередині. У цьому і багатьох інших метеоритах спостережено стійкість до вивітрювання краплеподібних мікронних зерен непрозорих мінералів.

У хондриті Бердянськ на мікроаналізаторі JXA-5 досліджено хімічний склад двох зерен нікелістого заліза і зерна троїліту із зональними вторинними оболонками; повністю заміщеного зерна неоднорідно сірого кольору; жилки гідроксидів заліза, розвиненої в силікатній матриці.

В обох зернах визначено хімічний склад металу на незмінених периферійних ділянках. У першому зерні по трьох вимірюваннях середній вміст за масою становить, %: Fe – 84,2 (84,1–84,3); Ni – 14,7 (14,6–14,9); Co – 0,69 (0,68–0,71); Mn – 0,10 (0,05–0,26); сума – 99,7 (99,5–99,9). У дужках тут і надалі – граничні значення вмісту. В другому зерні хімічний склад такий, %: Fe – 84,6;

Стадії вивітрювання хондритів із метеоритної колекції ННПМ НАН України, відповідно до класифікаційної шкали Ф. Влотського [27]

Метеорит *	Рік падіння/знахідки **, місце походження [10, 12]	Стадія вивітрювання, відповідно до [27]
Білокриниччя (H4)	1887, Хмельницька	W0
Піліствере (E6)	1868, Естонія	W0
Савченське (LL4)	1894, Одеська	W1
Окніни (LL5)	1834, Волинська	W1
Вавилівна (LL6)	1876, Херсонська	W1
Жигайлівка (LL6)	1787, Сумська	W1
Андріївна (L3-4)	1969, Донецька	W1
Довга Воля (L5-6)	1864, Волинська	W1
Грослібенталь (L6)	1881, Одеська	W1
Кукшин (L6)	1938, Чернігівська	W1
Кулішівка (L6)	1811, Сумська	W1
Леонівна (L6)	1900, Чернігівська	W1
Горлівка (H4)	1974, Донецька	W1
Олександрівський Хутір (H4)	1900, Чернігівська	W1
Біла Церква (H5)	1796, Київська	W1
Жовтневий Хутір (H5)	1938, Донецька	W1
Дзвінкове (H5)	1955, Київська	W1
Кримка (LL3)	1946, Миколаївська	W1-2
Княгина (L5)	1866, Закарпатська	W1-2
Оленівка (L5)	1951, Донецька	W1-2
Забориця (L6)	1818, Житомирська	W1-2
Саратов (L4)	1918, Росія, Саратовська	W2-3
Мордвинівка (L6)	1826, Дніпропетровська	W2-3
Галків (H4)	1995, Чернігівська	W2-3
Одеса (H4)	1960, околиця м. Одеса	W2-3
Бердянськ (L6)	1843, Запорізька	W3-4

* У дужках – хіміко-петрологічна належність хондрита. ** Хондрити Бердянськ і Одеса є знахідками.

Ni – 14,5; Co – 0,71; сума – 99,8; хімічний склад згаданих металевих зерен відповідає плеситу. У вторинних оболонках навколо цих зерен по п'яти вимірюваннях визначено хімічний склад, %: FeO – 84,4 (79,3–90,2), досить високий вміст NiO – в середньому 9,60 (7,21–11,2), незначну, проте постійну наявність CoO – 0,40 (0,22–0,60), а також домішки Si, S, Ca та Mg. Появу сірки можна пояснити окисненням троїліту, наслідком розкладання якого є утворення розчину сірчаної кислоти, що мігрує в кам'яних метеоритах, дифундуючи по мікротріщинах, ультра- та мікропорах [19], а наявність Si, Ca і Mg – впливом оточуючих силікатів. У вторинній оболонці, утвореній навколо другого металевого зерна, порівняно з окисненою ділянкою в самому зерні, вміст нікелю та кобальту майже вдвічі нижчий, проте збільшується вміст сірки та кремнію. Наявність останнього зумовлена земною контамінацією силікатів. На вивітреній ділянці в зерні металу вміст хлору хоч і незначний, проте на порядок вищий, ніж в оболонці, – в середньому 0,6 та 0,06 % відповідно.

Рентгеноспектральними дослідженнями гіпідіоморфного зерна троїліту (розмір 107×160,5 мкм) із вторинною оболонкою отримані такі дані. На незмінній ділянці в середині зерна вміст основних елементів такий, %: Fe – 58,2; S – 38,0; Ni – 2,43; Co – 0,41; Cr – 0,06; сума – 99,1. Вторинна оболонка має концентрично-зональну будову. Безпосередньо із зерном контактує сіра зона, яка переходить у ширшу коричневатого-сіру, назовні, на контакт з силікатами, – у світло-сіру зону. Оскільки ширина зон менша за роздільну здатність зонда, тобто менша за 7 мкм, то за двома вимірюваннями отримано їх середній хімічний склад, %: FeO – 79,2 (79,0 і 79,4); NiO – 6,05 (4,57 і 7,52); CoO – 0,29 (0,23 і 0,35). Зафіксовано також домішку сірки, хлор відсутній.

У хондриті Бердянськ спостерігаються повністю заміщені зерна непрозорих мінералів. Досліджено одне гіпідіоморфне зерно розміром 160,5×133,7 мкм, неоднорідного кольору, переважно коричневатого-сірого, із світло-сірими дрібними (<10 мкм) ділянками. За двома вимірюваннями хімічний склад такий, %: FeO – 79,1 (78,5 і 79,7); NiO – 5,02 (4,07 і 5,96); CoO – 0,39 (0,31 і 0,47). Як домішки є сірка, кремній і магній; хлор відсутній. Подібність наведених даних до даних хімічного складу вторинної оболонки навколо зерна троїліту дає змогу припустити доземний троїлітовий склад вивітреного зерна.

Силікати матриці, які за даними рентгеноспектрального аналізу представлені олівіном (Fa₂₆), ромбічним піроксенном (Fs₂₂) та плагіоклазом (альбіт-олігоклазом), пронизані потужними, завширшки до 100 мкм, ритмічно-зональними гідроксидними жилками (спостерігаються 3–4 зони різного відтінку – від світло-сірого до коричневатого-сірого). Ці вторинні жилки збагачені нікелем, кобальтом та сіркою, хлор у них відсутній. Визначений за трьома вимірюваннями середній хімічний склад становить, %: FeO – 80,5 (80,0–81,1); NiO – 5,76 (4,42–7,85); CoO – 0,39 (0,3–0,46); SiO₂ – 1,21 (0,92–1,55); S – 0,58 (0,31–1,1). Відзначено непостійні домішки магнію, фосфору, слідові кількості алюмінію, хлору – до 0,08 %. Силікатні зерна матриці зазвичай окиснені на контактах із вивітряними непрозорими зернами, проте силікатні включення у досліджених металевому і повністю окисненому зернах лишаються незмінними.

Загалом у продуктах вивітрювання метеорита Бердянськ за 14 вимірюваннями встановлено значний вміст NiO – у середньому 8,44 % (4,07–16,1). Найменший вміст зафіксовано всередині повністю заміщеного зерна, найбільший – на вивітраних ділянках у металевому зерні. Постійно наявний CoO, вміст за 14 вимірюваннями – в середньому 0,40 % (0,22–0,60). Процеси окиснення зумовили підвищену міграцію нікелю і кобальту, перехід їх у вторинні оболонки з можливістю утворення Ni-вмісних оксидів-гідроксидів. Явища збагачення нікелем екзогенних продуктів вивітрювання залізних метеоритів описано в монографії Д.Д. Бадх'ю [2]. Ці процеси також спостерігаються за вивітрювання кам'яних метеоритів.

Установлено, що у вторинних оболонках навколо непрозорих зерен вміст хлору не перевищує межі чутливості приладу (до 0,06 %). Його наявність (до 0,5–0,69 %) зафіксовано на вивітрених периферійних ділянках у металі.

У хондриті Мордвинівка мікророндовими дослідженнями найбільшого (0,6–0,8 мм) металевого зерна неправильної форми, заміщеного на 60 % гідроксидами заліза, встановлено, що зерно на неокиснених ділянках складено камаситом із середнім вмістом за трьома вимірюваннями, %: Fe – 92,0 (91,6–92,2); Ni – 7,04 (6,8–7,31); Co – 0,83 (0,74–0,89) (у дужках – границі вимірювань). Середній хімічний склад гідроксидної оболонки навколо зерна становить за двома вимірюваннями, %: FeO – 70,4 (68,5 і 72,3); NiO – 6,37 (4,92 і 7,82); CoO – 0,58 (0,54 і 0,62); Cl – 0,79 (0,73 і 0,85). Наявні магній, кальцій, сірка і кремній.

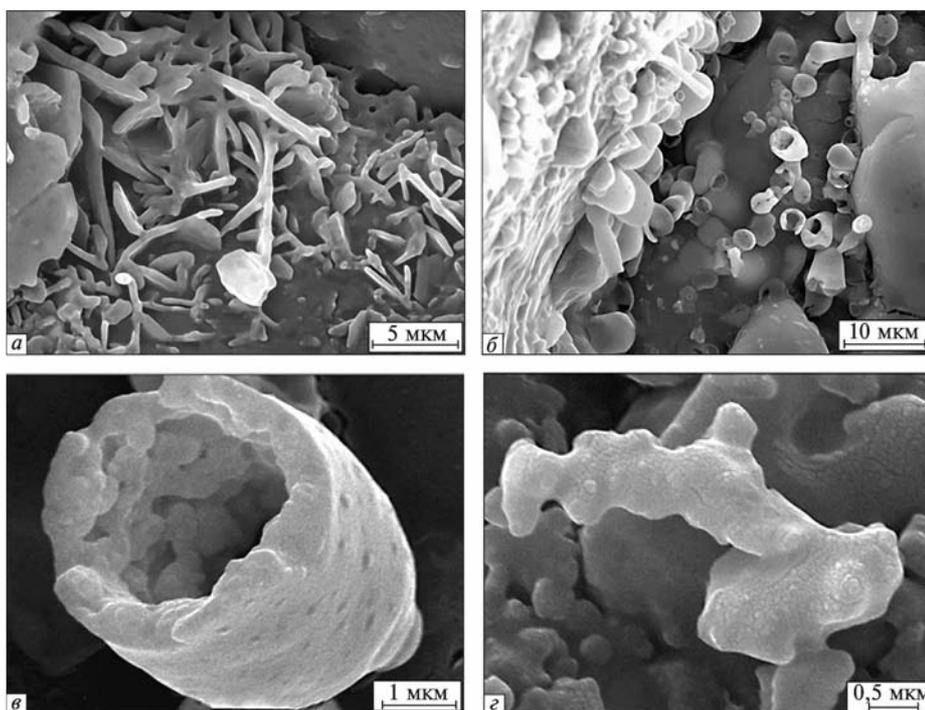
Гідроксидні плівки, що розвиваються по поверхні металевого зерна, за трьома вимірюваннями мають такий середній хімічний склад, %: FeO – 72,6 (71,1–75,5); NiO – 6,19 (5,23–6,76); CoO – 0,78 (0,70–0,84); Cl – 2,48 (1,65–3,62), також у незначній кількості є сірка. За даними аналізу, найбільший вміст хлору (3,6 %) зафіксовано на вивітреній ділянці у металі, що може засвідчувати ймовірність утворення Cl-вмісних акаганеїту, лепідокрокіту, голандиту саме на зрізах зерен, тобто на поверхні аншлифа під час окиснення в лабораторних умовах. Джерелом хлору може бути як зовнішнє середовище, так і внутрішній чинник, тобто наявність нестійкого у земних умовах лавренситу FeCl₂ [9], який у повітрі швидко окиснюється і переходить у молізит FeCl₃ [19], що сприяє подальшій руйнації метеоритного заліза.

Нерівномірне буре забарвлення дрібнозернистої силікатної матриці хондрита Саратов пов'язане із частково окисненими непрозорими зернами. Спостерігається вивітрювання великих зерен камаситу, а також металево-троїлітових оболонок навколо хондр. У брекчіюваних зернах троїліту гідроксиди заліза розвиваються по сіточці тріщин. У матриці та хондрах спостерігаються гіпідіоморфні вивітрєні зерна сірого кольору, часто в агрегаті з металом і троїлітом. Проте дрібні металеві зерна, більшість зерен троїліту, металево-троїлітові агрегати не вивітрєні.

Більш вивітрєними є катаклазовані розкриталізовані (мікропорфірові, складної будови) хондри із непрозорими вклученнями. В окремих нетріщинуватих скляних, мало розкриталізованих і круглих хондрах окисненими є контури, частково периферійні ділянки та тріщини всередині.

За допомогою сканувальних електронно-мікроскопічних (SEM) досліджень на поверхні сколів метеоритів Оленівка і Кулішівка виявлено тонкі кірочки продуктів вивітрювання, скупчення пластинчастих кристаликів мікрометрових розмірів (хондрит Оленівка, рисунок, а). Подібні скупчення (ймовірно, кристаликів лепідокрокіту) знайдені на поверхні місячних зразків [14]. Крім цих екзогенних форм виявлено мікрометрові кулькоподібні, видовжені циліндричні і дендритні утворення, які раніше спостерігались [9] на поверхні сколів звичайних хондритів, зокрема метеорита Кримка. Такі екзотичні утворення за складом відповідають Cl-акаганеїту, вони ростуть із пор метеоритів. Автори відзначили, що хімічний склад та морфологічні особливості цих об'єктів указують на послідовність їх утворення у пластичному стані з подальшим вибуховим розкриттям.

У метеориті Кулішівка наявні окремі та скупчені кульки. Вони закриті, напіввідкриті, а також відкриті з розкриталізованим дном і стінками, складеними пластинчастими кристаликами. Видовжені форми бувають закриті, відкриті



Растрове електронно-мікроскопічне зображення:

а – скупчення пластинчастих кристаликів, що утворились на поверхні сколу хондрита Оленівка; б – сферичні та видовжені екзотичні утворення на поверхні сколу метеорита Кулішівка; в – блокова будова внутрішньої стінки відкритого екзотичного утворення циліндричної форми на поверхні сколу хондрита Кулішівка; г – скульптура поверхні дендритоподібного екзотичного утворення на поверхні сколу хондрита Жовтневий Хутір

(рисунк, б), видно блокову будову їх внутрішньої поверхні (рисунк, в), що, відповідно до [9], засвідчує метастабільність колоїдного стану вторинних утворень та їх поступову дегідратацію. Хімічний склад цих утворень не визначали.

Із представників Н-групи найбільш вивітраним є хондрит Одесса, до 80 % площі досліджуваних зразків якого має буре забарвлення. За даними [3], нікелісте залізо і троїліт частково або повністю заміщені на вторинні мінерали, які представлені магнетитом, гематитом, гідроксидами заліза, гіпсом, кальцитом.

Силікатна складова пронизана жилками гідроксидів заліза, про що повідомлялось раніше [12]. На цьому етапі досліджень спостережено вивітрювання периферійних ділянок усіх хондр, часто по тріщинах, які проникають всередину дрібних ізометричних силікатних зерен.

За даними [24], метеорит Галків, досліджений через рік після падіння, був майже не вивітраним. У силікатах на контакті з деякими металевими зернами було спостережено тонкі жилки гідроксидів заліза. Відсутність гідроксидних оболонок навколо зерен нікелістого заліза і троїліту дала змогу авторам визначити нульову стадію вивітрювання метеорита, тобто W0, за класифікацією F. Wlotzka [27]. Під час повторного дослідження, через 12 років після падіння метеорита, виявлено заміщення периферійних ділянок більшості зерен нікелістого заліза і частини троїлітових зерен. Хондри вивітрені по контурах і тріщинах всередині. Очевидно, досить швидкому окисненню метеорита сприяють високий вміст заліза у матриці та умови збереження.

SEM-дослідженнями поверхні сколів метеорита Жовтневий Хутір виявлено ознаки механічної руйнації зразків: дезінтеграцію по численних тріщинах, скупчення мікронних уламків на поверхні сколів. Подекуди утворились кірочки гідроксидів заліза. Незважаючи на видиме макроскопічно побуріння сколів метеорита, на цьому етапі досліджень не знайдено екзотичних кулькоподібних вторинних утворень. Утім розвинуті дендритні утворення (рисунок, г) з тонкозернистою скульптурою поверхні та тріщинами усихання, що є характерним для колоїдів зони вивітрювання земної поверхні.

Єдиний представник енстатитових хондритів – метеорит Піліствере, складений табличками кристалів піроксену і зернами непрозорих мінералів. У досліджених зразках не виявлено ознак вивітрювання, що узгоджується з попередніми дослідженнями [11].

Таким чином, у результаті дослідження зразків хондритів з колекції ННПМ НАН України підтверджено висновки попередніх дослідників про те, що основними чинниками вивітрювання метеоритів є мінеральний склад, петрологічний тип, земний вік, кліматичні умови та умови їх збереження. Отримані електронно-мікроскопічні дані узгоджуються з висновком В.П. Семененко і А.Л. Гіріч [9], що саме розвиток колоїдних гідроксидів заліза у вигляді екзотичних об'єктів на поверхні сколів метеоритів засвідчує початкову стадію руйнації речовини. При цьому слід відзначити, що утворення колоїдних сумішей оксидів-гідроксидів заліза концентрично-зональної будови зумовлено переважно процесами окиснення та гідролізу в кислому середовищі гумідного клімату [5], вплив яких особливо позначився на метеоритах-знахідках. Як повідомлялося раніше [4], поширені в зоні гіпергенезу колоїдні та метаколоїдні гідроксиди заліза є активними сорбентами. Колоїдний стан сприяє міграційній здатності елементів [15], зокрема нікелю та кобальту, що пояснює значний вміст оксиду нікелю і постійну наявність оксиду кобальту серед продуктів вивітрювання.

Висновки. Результати структурно-мінералогічних і хімічних досліджень 26 хондритів із колекції ННПМ НАН України вказують на те, що більшість із них, а саме 19, характеризуються незначним рівнем вивітрювання зразків. Два хондрити – Білокриниччя та Піліствере класифіковано як невивітрені. Отже, 21 хондрит із досліджених зберігає доземні структурно-мінералогічні та хімічні характеристики; їх можна використовувати для з'ясування умов утворення та еволюції космічної речовини у космосі. Водночас 5 хондритів, особливо метеорит Вердянськ, досить інтенсивно змінені процесами земного вивітрювання і тому використовувати їх для інтерпретації доземних процесів можливо лише із урахуванням фізико-хімічних змін у земних умовах і з певними обмеженнями.

Дослідження показали, що хоча процес земного вивітрювання метеоритів у цілому досить повільний, для збереження їх зразків у музейних умовах потрібно контролювати рівень вологості та забруднення повітря. Легко вивітрювані екземпляри слід зберігати у закритих контейнерах.

Авторка глибоко вдячна науковому співробітнику Д.П. Дьоменку (Інститут ботаніки НАН України) і головному спеціалісту В.М. Сливінському (ІГНС НАН України) за технічну допомогу під час проведення електронно-мікроскопічних досліджень, науковому співробітнику І.М. Бондаренку (ІГМР ім. М.П. Семененка НАН України) – за допомогу в рентгеноспектральних вимірюваннях, а також завідувачеві відділу космоекології ІГНС НАН України, д-ру геол.-мінерал. наук проф. В.П. Семененко за обговорення результатів дослідження і допомогу в написанні статті.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Иванов О.К. Хондрит Северный Колчим // Метеоритика. – 1969. – Вып. 29. – С. 48–56.
2. Кваша Л.Г. Д.Д. Вадхью. Окисление и выветривание метеоритов // Там же. – 1959. – Вып. 17. – С. 133–139.
3. Кирова О.А., Дьяконова М.И. Каменный метеорит Одесса // Метеоритика. – 1969. – Вып. XXIX. – С. 36–47.
4. Кропачев А.М. Факторы миграции и осаждения малых (акцессорных) элементов в зоне гипергенеза. – Пермь, 1973. – 155 с.
5. Лукашев К.И., Лукашев В.К. Геохимия зоны гипергенеза. – Минск: Наука и техника, 1975. – 424 с.
6. Назаров М.А., Ульянов А.А., Барсукова Л.Д. и др. Петрография, минералогия и химический состав метеорита Бахардок // Метеоритика. – 1982. – Вып. 41. – С. 57–66.
7. Овчинников Л.Н., Юдин И.А. Исследование каменного метеорита Каргополье // Там же. – 1966. – Вып. 27. – С. 76–88.
8. Рамдор П. Рудные минералы и их сростания. – М.: Изд-во иностр. лит., 1962. – 1132 с.
9. Семененко В.П., Гирич А.Л. Природа экзотических объектов в метеоритах // Минерал. журн. – 1996. – 18, № 6. – С. 14–21.
10. 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. 72–81.
11. Семененко В.П., Самойлович Л.Г. Метеорит Пилиствере // Метеоритика. – 1982. – Вып. 40. – С. 28–33.
12. Семененко В.П., Собонович Э.В., Тертычная Б.В. Метеориты Украины. – Киев: Наук. думка, 1987. – 220 с.
13. Ульянов А.А. Минералы метеоритов // Материалы 14-го микросимп. по сравнит. планетологии Ин-та ГЕОХИ АН СССР и Ун-та Брауна. Москва, 26–30 авг. 1991. – М., 1991.
14. Фрондел Дж. Минералогия Луны. – М.: Мир, 1978. – 333 с.
15. Шербина В.В. Основы геохимии. – М.: Недра, 1972. – 296 с.
16. Юдин И.А. К минералогии метеорита Каали // Метеоритика. – 1968. – Вып. 28. – С. 44–50.
17. Юдин И.А. Микроскопическое исследование вторичных минералов метеоритов // Там же. – 1970. – Вып. 30. – С. 158–168.
18. Юдин И.А. К минералогии метеорита Северный Колчим // Тр. Ин-та геологии и геохимии Урал. фил. АН СССР. – 1970. – Вып. 86. – С. 157–161.
19. Юдин И.А., Коломенский В.Д. Минералогия метеоритов. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1987. – 200 с.
20. Юдин И.А., Логинов В.Н., Резникова Л.А. и др. Вторичные минералы и структуры метеорита Царев // Метеоритика. – 1983. – Вып. 42. – С. 55–65.
21. Buddhue J.D. The oxydation and weathering of meteorites. – Albuquerque Univ, New Mexico Press, 1957. – № 3. – 161 p.
22. Mackay A.L. β -Ferric oxyhydroxide // Mineral. Mag. – 1960. – 32. – P. 545–557.
23. Rubin A.E. Mineralogy of meteorite groups // Meteoritics. – 1997. – 32. – P. 231–247.
24. Semenenko V.P., Girich A.L. The Galkiv meteorite: A new H4 chondrite from Ukraine // Ibid. – 1998. – 33. – P. 193–196.
25. Stelzner Th., Heide K. The study of weathering products of meteorites by means of evolved gas analysis // Ibid. – 1996. – 31. – P. 249–254.
26. White J.S., Henderson E.P., Mason B. Secondary minerals produced by Weathering of the Wolf Creek meteorite // Amer. Mineral. – 1967. – 52, N 7/8. – P. 1190–1197.
27. Wlotzka F. A weathering scale for the ordinary chondrites // Meteoritics. – 1993. – 28. – P. 460.

Надійшла 26.03.2008

S.N. Shyrinbekova

COMPARATIVE DESCRIPTION OF THE WEATHERING
DEGREE OF CHONDRITES FROM THE METEORITE COLLECTION
OF NATIONAL NATURAL-SCIENCE MUSEUM OF NAS OF UKRAINE

The work "Comparative description of the degree of weathering of chondrites ..." presents results of optical-microscopical, electronic-microscopical and X-ray spectrometry studies of earth weathering products in 26 chondrites belonging to various chemical groups and petrologic types from the meteorite collection of National Scientific Nature Museum of NAS of Ukraine. It is shown that colloid state of ferric hydroxides, which are the earliest meteorite weathering products and have high sorption properties, promotes further intense decay of meteorites. The optimal air humidity and clearness levels are recommended to be kept in the museum premises for better conservation of the meteorites.