
doi: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2017.09.076>

УДК 523.681

В.П. Семененко, Т.М. Горovenko

Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М. П. Семененка НАН України, Київ

E-mail: cosmin@i.ua

Ниткоподібні кристали в метеоритах

Представлено академіком НАН України О.М. Пономаренком

Проаналізовано оригінальні та літературні дані про знахідки ниткоподібних кристалів у метеоритах. Показано, що вони мають різну природу і характерні для зерен олівіну, графіту і піроксену в хондритах, рабдиту та Fe,Ni-металу — в залізних метеоритах та паласитах, а гідроксидів заліза — у вивітрених метеоритах. За морфологічними характеристиками ниткоподібні кристали відповідають штучно вирощеним, хоча і відрізняються меншим різноманіттям кристалічних форм та пріоритетністю умов утворення.

Ключові слова: метеорити, ниткоподібні кристали, мінерали, походження, метаморфічне перетворення.

Завдяки специфічності зовнішньої форми ниткоподібні кристали (НПК) займають особливе місце серед різноманіття кристалічних індивідів. Вони були давно відомі в земних породах [1, 2] і відносно недавно виявлені в метеоритах [3] і місячних породах, але актуальності у вивченні набули лише після встановлення їх унікальних фізичних та хімічних властивостей. Згідно з експериментальними дослідженнями, для них характерно значне домінування довжини (0,5 — $n \cdot 10$ мм) над товщиною (0,5—50 мкм), співвідношення яких вище 10, оригінальна форма у вигляді голок, волокон, стрічок, пластинок, трубок, спіральних рулетів, монокристалічна будова, досконалість структури і поверхні, зокрема майже повна відсутність дислокацій, висока швидкість росту в процесі кристалізації [2, 4—6]. Морфологічні та структурні особливості НПК зумовили їх підвищені міцність і твердість, здатність витримувати значні пружні деформації, специфічні теплові, електричні та магнітні властивості, а також хімічну інертність. Завдяки таким характеристикам НПК металів, графіту, карбиду кремнію, оксиду алюмінію та інших матеріалів стали пріоритетним об'єктом досліджень в області матеріалознавства. Необхідність створення нових матеріалів із заданими властивостями зумовили активізацію експериментальних робіт по вирощуванню штучних монокристалів із газової фази, розчинів та розплавів, що дало можливість глибоко проникнути в наносвіт НПК і зрозуміти їх природу.

Незважаючи на значну кількість публікацій, вивчення штучно вирощених НПК до цього часу базується на фундаментальних дослідженнях Г.В. Бережкової (1969) [5] та Є.І. Гі-

© В.П. Семененко, Т.М. Горovenko, 2017

варгізова (1976) [6]. Слід відзначити, що деякі дослідники як аналог терміну “ниткоподібні кристали” використовують також термін “віскери”. Однак, за визначенням В.Г. Сиркіна [2, с.12], віскери — це “нитки, що виростили на поверхні інших, крупніших кристалів”, а не всередині твердих фаз. Тобто вони є різновидом НПК.

У даній роботі ми сконцентрували увагу на НПК, які були знайдені нами впродовж тривалого часу в результаті структурно-мінералогічних досліджень різних типів і груп метеоритів. Аналіз цих даних і їх систематизацію з урахуванням результатів, отриманих раніше іншими дослідниками, зроблено вперше з метою з’ясування механізмів утворення і еволюції НПК в екстремальних умовах космосу в широкому хронологічному діапазоні — від конденсаційних процесів у газопиловій протопланетній туманності і до процесів вивітрювання на Землі.

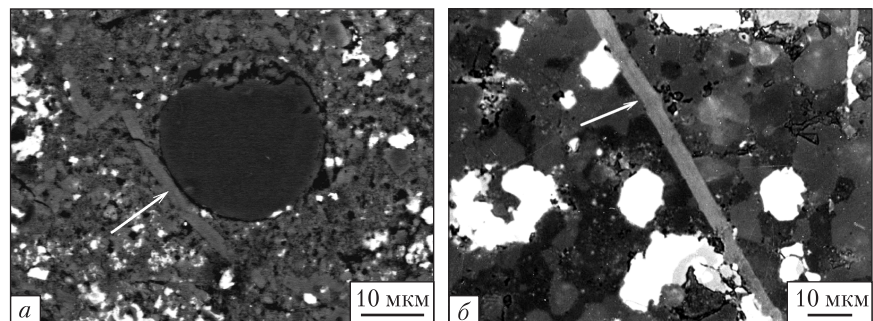
У метеоритах НПК мають різну природу і відмічені для зерен олівіну, графіту і Са-піроксену в хондритах, рабдиту і Fe,Ni-металу в залізних та залізокам’яних метеоритах та гідроксидів заліза у вивітрених метеоритах. Нижче зупинимося детальніше на знахідках НПК, їх характеристиках і ймовірних механізмах утворення відповідно до еволюційної послідовності, а не до ступеня поширення в різних типах метеоритів.

НПК олівіну $(Mg, Fe)_2[SiO_4]$ в хондритах (рис. 1, а) знайдені в тонкозернистих силікатних оболонках хондр, вуглисто му ксеноліті ВК 13, бітумовмісному ксеноліті РС, а також у матриці хондриту Кримка (LL3.1) [7, 8]. Характерними особливостями кристалів є ниткоподібна форма в шліфах, наявність поперечних тріщин, ознак дроблення на окремі блоки та пластичних деформацій, а також вищий вміст фаялітового компонента (Fe_{54-94} — [8]), ніж в округлих зернах олівіну.

Беручи до уваги наявність НПК серед олівін-піроксенової тонкозернистої речовини, яка є, найімовірніше, примітивним продуктом акреції в різному ступені змінених пилових конденсатів, можна зробити припущення про їх швидке утворення з газу протопланетної газопилової туманності в умовах нерівноважного росту [7, 8]. У даному випадку маємо приклад найпоширенішого в природі механізму росту НПК за нерівноважних умов із газової фази. Пластичні і крихкі деформації в кристалах зумовлені процесами м’якої акреції під час утворення окремих текстурних одиниць і материнських тіл хондритів у цілому, а також подальших імпактних перетворень метеоритів.

Зважаючи на ниткоподібну форму кристалів у шліфах, тобто в перетині, можна зробити припущення про пластинчасту форму кристалічних індивідів, товщина яких відповідає субмікронним розмірам. Фактично такі кристали характеризуються високорозвинутою ак-

Рис. 1. СЕМ зображення НПК олівіну (а) в тонкозернистій силікатній речовині вуглисто му ксеноліті ВК 13 (у відбитих електронах) [7] та оптично-мікроскопічне зображення графіту (б) в ксеноліті Gr1 [3] у полірованих шліфах хондриту Кримка



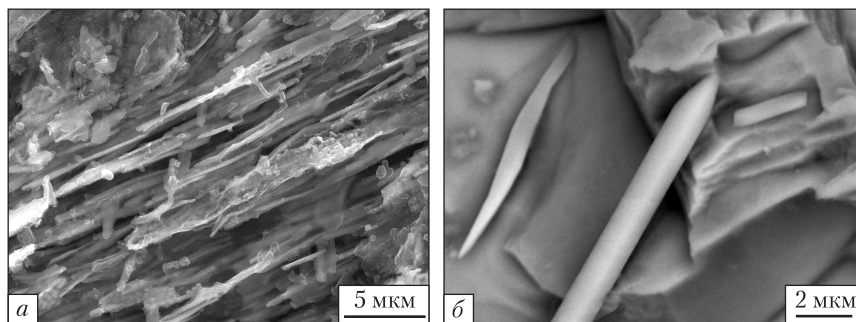


Рис. 2. СЕМ зображення у вторинних електронах НПК теніту (а) на вивітреній поверхні атакситу Чінге [10] та рабдиту (б) циліндричної форми з конусоподібною вершиною на протравленій поверхні полірованого шліфа паласиту Омолон

тивною поверхнею, що може пояснити найвищий вміст Fe в них серед олівіну тонкозернистої речовини. Саме для НПК дифузійні процеси заміщення Mg на Fe в умовах газопилової туманності, що охолоджувалася, були пріоритетними.

НПК графіту (див. рис. 1, б) були діагностовані в унікальному графітовмісному ксеноліті Gr1 у полірованому шліфі хондриту Кримка [3]. Правильні призматичні кристали рідкісного в метеоритах мінералу – графіту, характеризуються рівномірним розподілом серед силікатних мінералів, варіацією розмірів у межах $80 \times 6 - 20 \times 5$ мкм, розташуванням на фазових границях інших мінералів, середнім вмістом (% (мас.)) C (98,6) і домішок Fe (1,03), Si (0,41), Mg (0,17), Na (0,10), Ni (0,08), Al (0,05), а також незначними варіаціями хімічного складу від зерна до зерна. За результатами дослідження було зроблено припущення про раннє і швидке формування НПК графіту у вигляді ниток або пластинок із перенасиченого вуглецем силікатного розплаву. Але подальше вивчення нових знахідок графітовмісних ксенолітів Gr2-7 з різним ступенем перекристалізації вказує на метаморфічну природу графіту, який утворився, найімовірніше, з органічних сполук проторечовини ксенолітів [9].

НПК теніту (γ -Fe-Ni) в атакситі Чінге (рис. 2, а). Одна з особливостей високонікелевих атакситів групи IVB зумовлена надзвичайно тонкою будовою плеситової матриці, в якій у вигляді лінз розташовані субпаралельні системи камасит-тенітових зародків. Сканувальне електронномікроскопічне (СЕМ) дослідження глибоко протравленої ніталом (розчин HNO_3 в спирті) полірованої поверхні атакситу свідчить про стрічкувату будову плеситової матриці, для якої характерне щільне розташування паралельних тенітових стрічок. Цікаві результати отримані під час вивчення скульптури поверхні вивітраних у земних умовах зразків атакситу [10]. Селективне вивітрювання камаситу (α -Fe-Ni), тобто низьконікелевої фази, в тонкоструктурному плеситі дало можливість з'ясувати будову теніту. Згідно з результатами СЕМ досліджень, він представлений субпаралельними голчастими кристалами, що свідчить про пріоритетний ріст теніту на ранніх стадіях розкристалізації Fe,Ni-металу в процесі повільного охолодження материнського тіла метеорита. Ріст НПК теніту у вигляді голок або стрічок був зумовлений, найімовірніше, твердофазовою дифузією Fe і Ni в металі. За даними літератури, спусковим механізмом росту НПК у твердому тілі могли бути численні дислокації [2], виникнення яких у космічних зразках пов'язано з їх інтенсивним опроміненням на ранніх етапах еволюції. Допускається [10], що подальша катастрофічна подія (наприклад, імпаکتний розпад) різко підвищила швидкість охолодження метеорита, що викликало замороження продуктів раннього твердофазового перетворення в системі Fe-Ni.

НПК рабдиту (Fe, Ni)₃P в залізних і залізокам'яних метеоритах (див. рис. 2, б). Рабдит (морфологічний різновид шрейберзиту), як другорядний мінерал, є найпоширенішим представником НПК у залізних і залізокам'яних (паласитах) метеоритах. Згідно з експериментальними даними [11], кристали рабдиту мають дифузійну природу і утворюються за рівноважних умов у процесі повільного охолодження нікелістого заліза в межах 600–500 °C із камаситу, що містить 0,5–0,8 % (ат.) P. Зародження кристалів у камаситі відбувається однорідно, причому чим більший об'єм металу, тим швидше росте рабдит і тим більший він за розміром. Вміст Ni в ньому знаходиться у зворотній залежності від швидкості росту і розміру кристалів.

Традиційні дослідження полірованих шліфів залізних метеоритів і паласитів вказують на наявність у них двох морфологічних різновидів кристалів рабдиту — призматичного і ізометричного, у зв'язку з чим висунуто припущення про належність їх до двох систем паралельних призматичних кристалів, які орієнтовані під кутом один до одного. При цьому необхідно відзначити, що вперше серед залізних метеоритів, а саме в октаедриті Мар'їнка із загадковою історією знахідки, безпосередньо в полірованому шліфі було знайдено гігантський НПК рабдиту завдовжки >300 мкм і завтовшки 3 мкм, найімовірніше, пластинчастої форми.

Для з'ясування реальної форми кристалів рабдиту було проведено глибоке травлення ніталом поверхні полірованих шліфів залізних метеоритів Сіхоте-Алінь і Мар'їнка [12, 13] з подальшим їх СЕМ-дослідженням. Завдяки високій швидкості травлення камаситу порівняно з тенітом і хімічній стійкості рабдиту до ніталу були встановлені три морфологічні різновиди рабдитових кристалів (переважно дощаті, стовпчасті і меншою мірою голчасті), більшість з яких мали ознаки ударно-метаморфічних перетворень, а саме структури крихких і пластичних деформацій, а також повторного нагріву. Досконала спайність у рабдиті сприяла виникненню тріщин по (001), інколи — по площині тетраедра (111), а також зсуву окремих блоків, а підвищені пружні властивості ниткоподібних кристалів — їх згину внаслідок проходження ударної хвилі. Те, що окремі кристали зберегли свою форму, але мають ознаки нагріву, є свідченням ударного нагріву залізних метеоритів Сіхоте-Алінь і Мар'їнка до температури розпаду кристалів рабдиту, тобто близько 500 °C.

Завдяки сучасним СЕМ-можливостям особливо системно і детально вивчено морфологію НПК рабдиту в залізній матриці паласиту Омолон. На протравленій поверхні фрагментів металічного каркасу і полірованого шліфа чітко проявилися численні різноорієнтовані і майже рівномірно розподілені кристали рабдиту, а також закономірно орієнтовані системи паралельних НПК. Усі вони мають субмікронну товщину (переважно <1 мкм), довжину в одиниці—десятки мікрометрів і поділяються на голчасті, дощаті, пластинчасті та стовпчасті. Найпоширенішими серед них є голчасті кристали, які мають класичну голчасту або близьку до циліндричної форму переважно з видимою однією або двома конусоподібними або тетраедричними вершинами. Досить цікавими є голкоподібні кристали, які у незміненому вигляді перетинають як мінімум два—три монокристали камаситу, що свідчить про їх утворення ще до полікристалізації камаситу. Особливо чітко характер розподілу рабдиту в Fe,Ni-металі спостерігається на фоні негативних монокристалів полікристалічного камаситу. В багатьох випадках окремі НПК або системи паралельних кристалів характеризуються направленим ростом переважно у двох—трьох напрямках відповідно до первинної структури камаситу. Деякі з них мають ознаки незначної механічної деформації, а також імпактного нагріву.

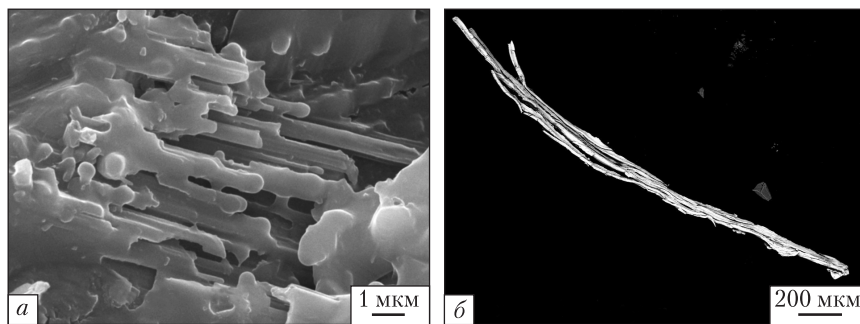


Рис. 3. СЕМ зображення у вторинних електронах НПК Са-піроксену (а), розташованого на покритій силікатним склом стінці порожнини у вуглистом ксеноліті AL1 хондриту Allende, та Fe,Ni-металу (б) з ознаками ударної деформації, що знайдені в олівіновій фракції паласиту Омолон

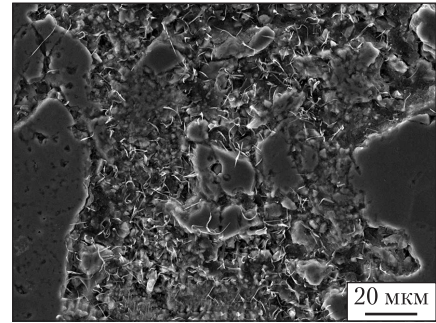
На жаль, через субмікронні та мікронні розміри НПК не було можливості отримати прецизійні дані по хімічному складу рабдиту, а відповідно, і визначити характер варіації його складу між різними морфологічними типами. Згідно з результатами енергодисперсійних досліджень, найвище значення вмісту Р в окремих кристалах розміром не менше 4 мкм відповідає 21,7, а Ni — 56,1 % (мас.). Якщо інтерполювати ці дані лише на рабдит, не враховуючи впливу хімічного складу камаситу, то концентрація Р і Ni в НПК повинна бути дещо вищою.

Таким чином, на відміну від залізних метеоритів [12, 13] рабдит у паласиті Омолон характеризується більшим морфологічним різноманіттям, а також обмеженим поширенням деформаційних структур і ознак нагріву, що зумовлено в першому випадку дещо швидшим охолодженням його материнського тіла в діапазоні температур 600–500 °С, а відповідно, і нижчим ступенем хімічної рівноваги, а в другому — відмінностями в їх ударно-метаморфічній історії. Не виключено також, що деяка нерівноважність умов утворення НПК у паласитах має локальний характер і пов'язана з наявністю силікатної фази.

НПК Са-піроксену (рис. 3, а) діагностовано у вуглистом тонкозернистому ксеноліті AL1 із хондриту Allende (CV3) [14]. Вони представлені системою субпаралельних кристалів, які розташовані на стінці порожнини ксеноліту і характеризуються заокругленими вершинами та ребрами. Заокругленість кристалографічних елементів може бути зумовлена як нерівноважними умовами утворення, так і подальшими процесами їх розчинення. Допускається, що формування НПК Са-піроксену пов'язано, найімовірніше, з нерівноважним ростом з імпаکتного газу в процесі ударно-метаморфічного перетворення материнського тіла метеорита.

Ниткоподібні утворення Fe,Ni-металу (див. рис. 3, б) як рідкісний випадок діагностовано на поверхні металічного каркаса та в олівіновій фракції паласиту Омолон [15]. Вони представлені ниткоподібними відгалуженнями, а також окремими нитками, волокнами або їх скупченнями, мають сірий колір під бінокелем, довжину до 2 мм та товщину 20–30 мкм і характеризуються наявністю скульптур ударної деформації та нагріву. За даними енергодисперсійних досліджень, ниткоподібні утворення мають моно- або поліфазний склад і представлені камаситом, тенітом або їх тонкою сумішшю — плеситом. Беручи до уваги наявність на поверхні Fe,Ni-каркаса НПК відгалужень, а також неоднорідність фазового і хімічного складу, можна зробити висновок про їх належність до псевдовіскерів. Тобто до утворень, сформованих у результаті імпаکتного часткового плавлення речовини Fe,Ni-каркаса з миттєвим проникненням розплаву в міжзерновий простір метеорита і його гартуванням внаслідок ударно-метаморфічних процесів у космосі. Водночас НПК, що знайдені в олівіновій фракції, могли сконденсуватися з імпаکتного газу металу в міжзерновому просторі паласиту.

Рис. 4. СЕМ зображення НПК гетиту (у відбитих електронах), що виростили на поверхні полірованого шліфа хондриту Allende протягом трьох років після його виготовлення



НПК є ординарним компонентом серед продуктів земного вивітрювання (рис. 4) метеоритів усіх типів. Вони представлені переважно окремими голкоподібними та пластинчастими кристалами гідроксидів заліза або їх скупченнями у вигляді розеток. Враховуючи розташування таких кристалів на поверхні мінеральних зерен, їх можна віднести до віскерів. Відомо, що метеорити, переважна більшість яких вміщує нікелісте залізо та сульфід заліза і утворюються у високовідновних умовах космосу, є досить нестійкими до дії земної атмосфери і води. На основі моніторингу продуктів вивітрювання є підстави вважати, що чим вищий ступінь примітивності і неоднорідності складу метеоритів, тим вища швидкість їх вивітрювання. Так, наприклад, після виготовлення полірованого шліфа ксеноліту AL1 вуглистого метеорита Allende на його поверхні досить швидко (протягом трьох років) виростили НПК гетиту (FeOOH). Примітно, що вони густо проросли лише на поверхні тонкозернистої силікатної речовини, а не на крупних силікатних кристалах (див. рис. 4), що вказує на селективний характер розвитку НПК, пов'язаний з відмінностями в розмірах зерен і в ступені неоднорідності складу речовини хондриту.

Результати лабораторних спостережень продуктів вивітрювання в метеоритах вказують на пріоритетний розвиток серед них ниткоподібних і пластинчастих форм з високоактивною поверхнею, а відповідно, і з підвищеними адсорбційними властивостями. Саме ця морфологічна і фізична особливість є додатковим фактором, який сприяє послідовному інтенсивному руйнуванню метеоритної речовини в земних умовах.

Таким чином, короткий аналіз результатів оригінальних досліджень та частково літературних даних дає змогу зробити такі висновки і припущення. 1. НПК метеоритів мають доземне і земне походження. 2. Серед доземних найпоширенішими є кристали рабдиту в залізних метеоритах і паласитах, теніту – в атакситах і графіту – у вуглистих ксенолітах хондритів. Допускається, що вони утворилися в результаті твердофазових перетворень у процесі повільного охолодження материнського тіла метеоритів. На відміну від них НПК олівіну і піроксену з тонкозернистої речовини хондритів, а також Fe,Ni-металу із паласиту є рідкісними. НПК олівіну належать, найімовірніше, до продуктів конденсації газової фази протопланетної туманності, а піроксену і Fe,Ni-металу – до конденсатів імпаکتного газу. 3. НПК земного походження є ординарним компонентом і представлені гідроксидами заліза в продуктах вивітрювання всіх типів метеоритів. Їх утворення зумовлене взаємодією високовідновної метеоритної речовини із атмосферою Землі.

У цілому НПК метеоритів мають багато спільних морфологічних характеристик зі штучно вирощеними ниткоподібними кристалами [2, 4–6], хоча і відрізняються меншим різноманіттям кристалічних форм та пріоритетністю умов утворення. Спільність морфологічних характеристик є цікавим фактом, оскільки умови кристалізації НПК в метеоритах і в експериментальних зразках різні. В більшості випадків метеоритні НПК сформовані із твердої фази при досить високій температурі переважно в умовах повільного охо-

лодження материнського тіла метеорита і лише незначна її частина — у процесі швидкого росту з газової фази. А в експериментальних зразках НПК є продуктом нерівноважної кристалізації з газу, розчинів, розплавів або твердих фаз. Очевидно, що відмінність середовища, хімічного складу і умов росту зумовила більше різноманіття форм НПК в експериментальних зразках відносно метеоритних.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Малеев М.Н. Свойства и генезис природных нитевидных кристаллов и агрегатов. Москва: Наука, 1971. 183 с.
2. Сыркин В.Г. Материалы будущего. О нитевидных кристаллах металлов. Москва: Госиздат, 1989. 92 с.
3. Semenenko V.P., Girich A.L. Mineralogy of a unique graphite-containing fragment in the Krymka chondrite (LL3). *Mineral. Mag.* 1995. **59**, № 396. P. 443–454. doi: <https://doi.org/10.1180/minmag.1995.059.396.06>
4. Артемьев С.Р., Белан С.В. Свойства и основные способы получения нитевидных кристаллов. *Вост.-Европ. журн. передовых технологий*. 2013. **5**, № 1. С. 22–25.
5. Бережкова Г.В. Нитевидные кристаллы. Москва: Наука, 1969. 158 с.
6. Гиваргизов Е.И. Рост нитевидных и пластинчатых кристаллов из пара. Москва: Наука, 1977. 303 с.
7. Semenenko V.P., Bishoff A., Weber I., Girich A.L. Mineralogy of fine-grained material in the Krymka (LL3.1) chondrite. *Meteorit. Planet. Sci.* 2001. **36**. P. 1067–1085. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2001.tb01945.x>
8. Weisberg M.K., Zolensky M.E., Prinz M. Fayalitic olivine in matrix of the Krymka LL3.1 chondrite: Vapor-solid growth in the solar nebula. *Meteorit. Planet. Sci.* 1997. **32**, № 6. P. 791–801. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.1997.tb01570.x>
9. Semenenko V.P., Girich A.L., Nittler L.R. An exotic kind of cosmic material: Graphite-containing xenoliths from the Krymka (LL3.1) chondrite. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2004. **68**, № 3. P. 455–475. doi: [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(03\)00457-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(03)00457-5)
10. Шпиринбекова С.Н., Семененко В.П. Особливості селективного вивітрювання атакситу Чінге. *Зан. Укр. мінерал. тов-ва*. 2006. **3**. С. 196–199.
11. Clarke R.S., Jr., Goldstein J.I. Schreibersite growth and its influence on the metallography of coarse-structured iron meteorites. *Smithsonian contributions to the earth sciences*, № 21. Washington: Smithsonian Institution Press, 1978. 80 p.
12. Григорьев Д.П., Крецер Ю.Л. К онтогении шрейберзита и рабдита в метеорите Сихотэ-Алинь. *Докл. АН СССР*. 1983. **270**, № 5. С. 1192–1195.
13. Семененко В.П., Козлов И.С., Тертычная Б.В. Признаки ударного метаморфизма в железном метеорите Марьянка. *Метеоритика*. 1986. Вып. 45. С. 102–105.
14. Семененко В.П., Гіріч А.Л., Кичань Н.В. Тонкозернистий ксеноліт AL1 в хондриті Allende (CV3): мінералогія та походження. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2012. № 8. С. 86–93.
15. Горovenko Т.М., Семененко В.П. Морфологічні особливості нікелістого заліза в паласиті Омолон. *Зан. Укр. мінерал. тов-ва*. 2011. **8**. С. 45–48.

Надійшло до редакції 06.03.2017

REFERENCES

1. Maleev, M. N. (1971). Properties and origin of the natural filiform crystals and aggregates. Moscow: Nauka (in Russian).
2. Syrkin, V. G. (1989). Materials of the future. About the metal filiform crystals. Moscow: Gosizdat (in Russian).
3. Semenenko, V. P. & Girich, A. L. (1995). Mineralogy of a unique graphite-containing fragment in the Krymka chondrite (LL3). *Mineral. Mag.*, 59, No. 396, pp. 443-454. doi: <https://doi.org/10.1180/minmag.1995.059.396.06>
4. Artem'ev, S. R. & Belan, S. V. (2013). Properties and main methods of the filiform crystals producing. *Vost.-Evrop. zhurn. peredovyh tehnologij*, 5, No. 1, pp. 22-25 (in Russian).
5. Berezhkova, G. V. (1969). Filiform crystals. Moscow: Nauka (in Russian).
6. Givargizov, E. I. (1977). Growth of filiform and lamellar crystals from vapor. Moscow: Nauka (in Russian).

7. Semenenko, V. P., Bishoff, A., Weber, I. & Girich, A. L. (2001). Mineralogy of fine-grained material in the Krymka (LL3.1) chondrite. *Meteorit. Planet. Sci.*, 36, pp. 1067-1085. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2001.tb01945.x>
8. Weisberg, M. K., Zolensky, M. E. & Prinz, M. (1997). Fayalitic olivine in matrix of the Krymka LL3.1 chondrite: Vapor-solid growth in the solar nebula. *Meteorit. Planet. Sci.*, 32, No. 6, pp. 791-801. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.1997.tb01570.x>
9. Semenenko, V. P., Girich, A. L. & Nittler, L. R. (2004). An exotic kind of cosmic material: Graphite-containing xenoliths from the Krymka (LL3.1) chondrite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 68, No. 3, pp. 455-475. doi: [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(03\)00457-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(03)00457-5)
10. Shyrinbekova, S. N. & Semenenko, V. P. (2006). Features of the Chinga ataxite selective weathering. *Zap. Ukr. mineral. tov-va*, 3, pp. 196-199 (in Ukrainian).
11. Clarke, R. S., Jr. & Goldstein, J. I. (1978). Schreibersite growth and its influence on the metallography of coarse-structured iron meteorites. *Smithsonian contributions to the earth sciences*, No. 21. Washington: Smithsonian Institution Press.
12. Grigor'ev, D. P. & Kreger, Y. L. (1983). About ontogeny of schreibersite and rhabdite in the Sikhote-Alin meteorite. *Dokl. AN SSSR*, 270, No. 5, pp. 1192-1195 (in Russian).
13. Semenenko, V. P., Kozlov, I. S. & Tertychnaja, B. V. (1986). Evidences of shock metamorphism in the Mar'inka iron meteorite. *Meteoritika*, 45, pp. 102-105 (in Russian).
14. Semenenko, V.P., Girich, A.L. & Kychan, N.V. (2012). Fine-grained xenolith AL1 in the Allende (CV3) chondrite: mineralogy and origin. *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.*, No. 8, pp. 86-93 (in Ukrainian).
15. Gorovenko, T. M. & Semenenko, V. P. (2011). Nickel-iron morphological features in the Omolon pallasite. *Zap. Ukr. mineral. tov-va*, 8, pp. 45-48 (in Ukrainian).

Received 06.03.2017

В.П. Семененко, Т.Н. Горovenko

Институт геохимии, минералогии и рудообразования им. Н.П. Семененко НАН Украины, Киев

E-mail: cosmin@i.ua

НИТЕВИДНЫЕ КРИСТАЛЛЫ В МЕТЕОРИТАХ

Проанализированы оригинальные и литературные данные о находках нитевидных кристаллов в метеоритах. Показано, что они имеют разную природу и характерны для зерен оливина, графита и пироксена в хондритах, рабдита и Fe,Ni-металла — в железных метеоритах и палласитах, а гидроксидов железа — в выветренных метеоритах. По морфологическим характеристикам нитевидные кристаллы подобны искусственно выращенным, хотя и отличаются меньшим разнообразием кристаллических форм и приоритетностью условия образования.

Ключевые слова: метеориты, нитевидные кристаллы, минералы, происхождение, метаморфические преобразования.

V.P. Semenenko, T.M. Gorovenko

M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine, Kiev

E-mail: cosmin@i.ua

FILIFORM CRYSTALS IN METEORITES

The original and literature data on the findings of filiform crystals (FFC) in meteorites are given. It is shown that they have pre-terrestrial and terrestrial origins. Rhabdite crystals in iron meteorites and pallasites, taenite ones in ataxites, and graphite ones in carbonaceous xenoliths of chondrites are the most common among the pre-terrestrial FFC. It is assumed that their formation is a result of solid phase transformations during the slow cooling of meteorite parent bodies. Unlike them, the olivine and Ca-pyroxene FFC within a fine-grained matter of chondrites and Fe,Ni-metal FFC in pallasites are rare. The morphological characteristics of the meteoritic FFC are similar to those of the artificially grown ones, although they differ by a narrower variety of crystallographic forms and the priority of formation conditions.

Keywords: meteorites, filiform crystals, minerals, origin, metamorphic transformation.