

---

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](mailto: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 —  $n \times 10$  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, карбїду 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.

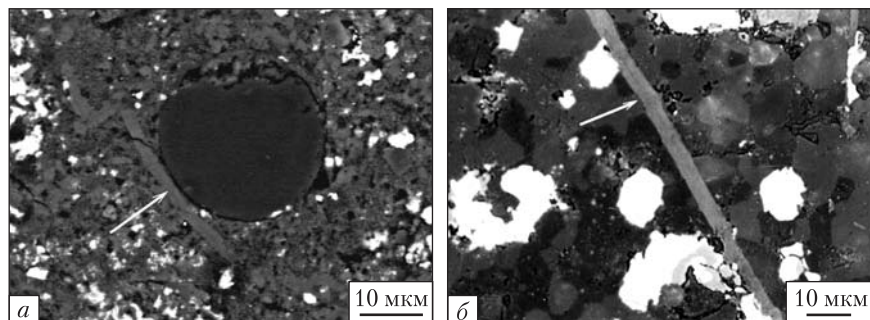
У метеоритах НПК мають різну природу і відмічені для зерен олівіну, графіту і Са-піроксену в хондритах, рабдиту і Fe, Ni-металу в залізних та залізокам’яних метеоритах та гідроксидів заліза у вивітрених метеоритах. Нижче зупинимося детальніше на знахідках НПК, їх характеристиках і ймовірних механізмах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

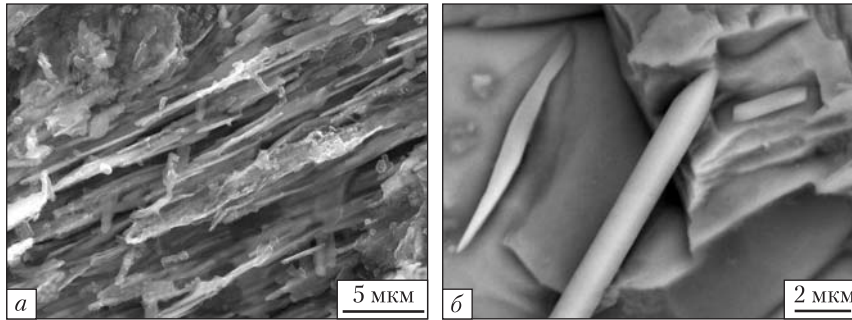
*НПК олівіну  $(Mg, Fe)_2[SiO_4]$  в хондритах* (рис. 1, а) знайдені в тонкозернистих силікатних оболонках хондр, вуглистої ксеноліті ВК 13, бітумовмісному ксеноліті РС, а також у матриці хондриту Кримка (LL3.1) [7, 8]. Характерними особливостями кристалів є ниткоподібна форма в шліфах, наявність поперечних 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 в 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 вуглистої 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].

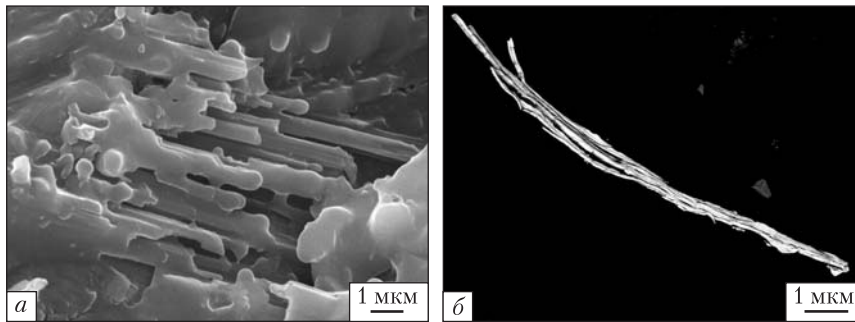
НПК теніту ( $\gamma$ -Fe-Ni) в атакситі Чінге (рис. 2, а). Одна з особливостей високонікелевих атакситів групи IVB зумовлена надзвичайно тонкою будовою плеситової матриці, в якій у вигляді лінз розташовані субпаралельні системи камасит-тенітових зародків. Сканувальне електронномікроскопічне (СЕМ) дослідження глибоко протравленої ніталом (розчин  $\text{HNO}_3$  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 вивітрених у земних умовах зразків атакситу [10]. Селективне вивітрювання камаситу ( $\alpha$ -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, імпактний розпад) різко підвищила швидкість охолодження метеорита, що викликало замороження продуктів раннього твердофазового перетворення в системі Fe–Ni.

НПК рабдиту ( $Fe, Ni$ )<sub>3</sub>P 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 °С із камаситу, що містить 0,5–0,8 % (ат.) Р. 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 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 завтовщки 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 °С.

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 імпаکتного 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.

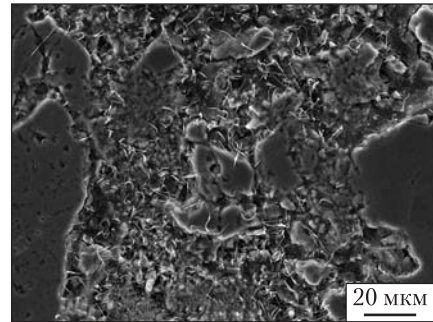
Таким чином, на відміну від залізних метеоритів [12, 13] рабдит у паласиті Омолон характеризується більшим морфологічним різноманіттям, а також обмеженим поширенням деформаційних структур і ознак нагріву, що зумовлено в першому випадку дещо швидшим охолодженням його материнського тіла в діапазоні температур 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 зумовлено 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 бінокляром, 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 НП 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 метеориту 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 вирости 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 вуглисто метеорита Allende на його поверхні досить швидко (протягом трьох років) вирости НПК гетиту ( $\text{FeOOH}$ ). 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 олівину і піроксену з тонкозернистої речовини хондритів, а також Fe,Ni-металу із паласиту є рідкісними. НПК олівину 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 високо відновної 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 їх 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. Vol. 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. <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. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(03\)00457-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(03)00457-5)
10. Ширінбекова 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 Марьинка. *Метеоритика.* 1986. Вып. 45. С. 102–105.
14. Семененко В.П., Гіріч А.Л., Кичань Н.В. Тонкозернистый 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. Syркин, 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. <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. <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. <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. [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. Горовенко*

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 условий 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.