

МІНЕРАЛОГІЯ ПИЛОВОЇ КОМПОНЕНТИ ПРОТОПЛАНЕТНОЇ ТУМАННОСТІ

Сучасні дані астрофізики однозначно свідчать про те, що субстратом для зародження зіркових систем, і Сонячної зокрема, є міжзіркові газопилові туманності Всесвіту, пилова компонента якої складена субмікронними і нанометричними аморфними та мінеральними зернами [8—10, 15]. Діагностика саме мінерального пилу в оболонках зірок і в міжзіркових туманностях є одним із головних доказів фундаментальності процесів мінералоутворення у Всесвіті, які не обмежуються лише планетарними, зокрема земними, умовами. Оскільки всі тверді тіла Сонячної системи утворились з пилу протопланетної газопилової туманності, то виникає питання: Чи збереглися залишки первісного пилу, а якщо збереглися, то в яких саме об'єктах і в якій кількості? Адже знання про його хімічний та мінеральний склад лежать в основі з'ясування умов походження Сонячної системи та її мінеральних ресурсів.

Із доступних для безпосереднього дослідження твердих тіл Сонячної системи недиференційовані метеорити, особливо вуглисті і нерівноважні звичайні хондрити, є єдиними представниками ранніх етапів розвитку протопланетної туманності, які містять релікти примітивного пилу у вигляді тонкозернистої речовини [5, 7, 10, 12]. Еволюційний шлях цієї речовини надзвичайно тривалий і складний, оскільки пов'язаний з нерівноважними і поліхронними фізико-хімічними процесами утворення і функціонування планетної системи. Первісні (родоначальні) характеристики мінерального пилу, сконденсованого із сонячного газу, були частково або повністю зміненими цими процесами [7, 5], що зумовило визначення його реліктів у метеоритах як первинних або примітивних.

Тонкозерниста речовина вуглистих і нерівноважних звичайних хондритів належить до рідкісного, найскладнішого і генетично важливого об'єкта дослідження, що знаходиться на межі або поза межами сучасних інструментальних можливостей. Досить відзначити, що серед 23 тис. відомих на Землі метеоритів релікти пилової компоненти знайдені лише у двох десятках примітивних хондритів і то в їхніх окремих текстурних одиницях — матриці, ксенолітах та оболонках хондр, ксенолітів і великих зерен [5, 12].

Тонкозернистість метеоритної речовини є необхідним, але недостатнім критерієм для визначення її примітивності. В переважній більшості тонкозерниста фракція хондритів належить до продуктів дезінтеграції твердих тіл у результаті багаторазових зіткнень з іншими тілами в доагломераційний період. Головними характеристиками тонкозернистої примітивної речовини в метеоритах [4—6, 9, 12—15] є темний до чорного колір, висока густина, мікро- та нанометричні розміри зерен, домінування силікатних мінералів над металевими та сульфідними, поліглобулярна будова субмікронних зерен, структурна складність тонких полімінеральних асоціацій, неоднорідність хімічного складу мінералів, наявність акцесорних зерен високотемпературних мінералів, частина з яких має досонячне походження, а також органічних сполук і графіту. Зупинимось детальніше на цих особливостях.

На макроскопічному рівні релікти пилової компоненти в хондритах ідентифікують завдяки чорному кольору незначних за розміром ділянок (переважно ≤ 3 мм) однорідної за будовою щільної силікатної речовини, структурно-мінералогічні особливості якої можна вивчити лише за допомогою електронного мікроскопа. Так, сканувальне електронно-мікроскопічне дослідження поверхні злому тонкозернистої силікатної речовини в примітивному ксеноліті ВК-14 хондриту Кримка [12] свідчить про складну поліглобулярну будову мінералів, в яких розміри видимих глобул відповідають ≤ 10 нм [4]. Така будова силікатів і сульфід-металевих мінералів у тонкозернистій фракції примітивних метеоритів вказує на існування зародків мінералів у вигляді нанометричних глобул (найімовірніше, в аморфному стані) і акреційних поліглобул на ранніх етапах еволюції протопланетної газопилової туманності.

Одною із важливих ознак примітивної речовини є дуже неоднорідний хімічний склад мінералів [5, 12], зумовлений низькотемпературною акрецією різнорідних пилових зерен мінералів. Межі коливання їх хімічного складу є значно ширшими, ніж в аналогічних мінералах розкристалізованих хондр, що чітко видно на прикладі вмісту фаяліту в олівіні та феросиліту в піроксені в примітивній силікатній речовині (Fa_{3-94} ; Fs_{3-45}) навколо хондри і в хондрі (Fa_{12-17} ; Fs_{8-13}) [3]. Крім того, силікатні та метал-сульфідні мінерали примітивної речовини збагачені метаморфогенними субмікронними включеннями [4], що вказує на конденсацію первісних мінералів у вигляді твердих розчинів у нерівноважних *PT*-умовах протосонячної туманності.

Важливим компонентом примітивних хондритів є релікти високотемпературних конденсатів (гібоніт, перовскіт, форстерит, анортит, карбіди, нітриди та ін.). Сучасні ізотопні дані вказують на існування двох головних поліхронних груп мінералів-конденсатів, тобто досонячних і сонячних [8, 9, 15]. Перші з них надзвичайно рідкісні, але на цей час вони є єдиним матеріальним об'єктом, який містить інформацію про хімічну еволюцію галактик, природу зірок, фізико-хімічні процеси в міжзірковому середовищі та сонячній протопланетній туманності.

У досонячних зернах діагностовані такі мінерали [1, 8, 9, 12, 15]: алмаз, графіт, карбід кремнію (SiC), деякі оксиди, когеніт ($\text{Fe,Ni}_3\text{C}$), нітрид кремнію (Si_3N_4), Ti -, Zr -, Mo -багаті карбіди, камасит (Fe,Ni), елементне залізо і олівін. Всі досонячні мінерали, крім алмазу, наявні в мізерних кількостях (від 3 ppm до 10 ppm) і мають розміри від нанометричних до субмікронних [15]. І лише окремі зерна графіту і муасоніту досягають 20 мкм. На відміну від метеоритних і земних аналогів, тобто від муасоніту (SiC з гексагональною структурою) і корунду (Al_2O_3 з тригональною структурою), досонячні зерна карбіду кремнію і оксиду алюмінію характеризуються структурним різноманіттям [9].

Хімічний та ізотопний склад переважної більшості сконденсованих високотемпературних мінералів був змінений внаслідок їх взаємодії з навколишнім газом, а також у результаті метаморфогенних процесів, пов'язаних переважно з ударним метаморфізмом. Наприклад, уперше знайдені нами в хондриті Кримка і в метеоритах взагалі унікальні зерна самородного вольфрама і срібла в асоціації з нікелістим залізом вказують на існування високо- та середньотемпературних конденсатів (відповідно, W- та Ag-вмісного металу) в пиловій компоненті протопланетної туманності [2, 4, 11].

Важливою складовою примітивної тонкозернистої речовини є органічні сполуки, які в метаморфізованих зразках трансформувались у графіт [6]. Дослідження вуглистих ксенолітів хондриту Кримка показали, що розміри кристалів графіту прямо залежать від ступеня метаморфічного перетворення речовини [13, 14]. Наявність органічних сполук свідчить про акрецію примітивних метеоритів у низькотемпературній зоні газопилової протопланетної туманності. На додаток слід також відзначити наявність водовмісних низькотемпературних мінералів, які є продуктами водних змін пилової компоненти туманності або тонкозернистої речовини материнських тіл метеоритів [16].

Короткий огляд літературних та оригінальних даних дає змогу дійти таких висновків щодо особливостей мінералогії пилових зерен протопланетної туманності.

1. У пиловій компоненті протопланетної туманності істотно домінують силікатні мінерали над метал-сульфідними, що узгоджується з даними щодо поширення хімічних елементів у космосі, а також мінерального складу міжпланетного пилу. Характерною складовою пилової компоненти є дуже поширені органічні сполуки та надзвичайно рідкісні зерна високотемпературних мінералів, частина з яких має досонячне походження.

2. Важливими ознаками реліктів примітивної речовини є нанометричні і субмікронні розміри зерен, їх поліглобулярна будова, а також неоднорідний хімічний склад мінералів, представлених твердими розчинами, що свідчить про перевагу нерівноважних процесів мінералоутворення над рівноважними в широкому діапазоні температур в газопиловій туманності.

3. Низькотемпературні процеси акреції ізотопно та мінералогічно гетерогенної космічної речовини в умовах її постійного перемішування і дезінтеграції сприяли збереженню реліктів протопланетного пилу в примітивних метеоритах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Семененко В.П. Мінералогія досонячних зерен // Геохімія та рудоутворення. — 2009. — 27. — С. 92—94.
2. Семененко В.П. Перша знахідка самородного срібла в метеоритах // Зап. Укр. Мінерал. тов-ва. — 2010. — 7. — С. 58—63.
3. Семененко В.П., Гіріч А.Л. Два типи зерен графіту в хондриті Кримка (LL3.1) // Мінерал. зб. Львів. ун-та. — 2010. — № 60, вип. 2. — С. 53—63.
4. Семененко В.П., Гирич А.Л., Ширинбекова С.Н. и др. Генетические типы нанометрических зерен минералов в метеоритах // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии — 2010. — 9, № 3. — С. 241—245.
5. Brearley A.J. Nature of matrix in unequilibrated chondrites and its possible relationship to chondrules // Chondrules and the Protoplanetary Disk / Eds. R.H. Hewins et al. — Cambridge Univ. Press., 1996. — P. 137—151.
6. Buseck P.R., Bo-Jun H. Conversion of carbonaceous material to graphite during metamorphism // Geochim. Cosmochim. A. — 1985. — 49. — P. 2003—2016.
7. Larimer J.W. The cosmochemical classification of the elements // Meteorites and the early Solar system. / Eds. J.F. Kerridge, M.S. Matthews. — Tucson: The Univ. of Arizona Press., 1988. — P. 375—389.

8. *Lodders K., Amari S.* Presolar grains from meteorites: Remnants from the early times of the solar system // *Chemie der Erde*. — 2005. — **65**. — P. 93—166.
9. *Nittler L.R., C.M. O'D. Alexander, R. Gallino et al.* Aluminium — calcium- and titanium-rich oxide stardust in ordinary chondrite meteorites // *The Astrophys. J.* — 2008. — **682**. — P. 1450—1478.
10. *Palme H., Jones A.* Solar system abundances of the elements // *Treatise on geochemistry. Meteorites, comets and planets* / Ed. A.M. Davis. — Elsevier: Pergamon, 2004. — P. 41—62.
11. *Semenenko V.P.* Native silver in a meteorite // *Meteoritics and Planet. Sci. Suppl.* — 2010. — **45**. — P. A187.
12. *Semenenko V.P., Bischoff A., Weber I. et al.* // *Mineralogy of fine-grained material in the Krymka (LL3.1) chondrite* // *Meteoritics and Planet. Sci.* — 2001. — **36**. — P. 1067—1085.
13. *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. A.* — 2004. — **68**. — P. 455—475.
14. *Semenenko V.P., Jessberger E.K., Chaussidon M. et al.* Carbonaceous xenoliths in the Krymka LL3.1 chondrite: Mysteries and established facts // *Geochim. Cosmochim. A.* — 2005. — **69**. — P. 2165—2168.
15. *Zinner E.K.* Presolar grains // *Treatise on geochemistry. Meteorites, comets and planets* / Ed. A.M. Davis. — Elsevier: Pergamon, 2004. — P. 17—39.
16. *Zolensky M., McSween H.Y.Jr.* Aqueous alteration // *Meteorites and the early Solar system* / Eds. J.F. Kerridge, M.S. Matthews. — Tucson: The Univ. of Arizona press., 1988. — **13**. — P. 114—143.