

ЧИ ЗБЕРЕГЛИСЬ У МЕТЕОРИТАХ СТРУКТУРНО-МІНЕРАЛОГІЧНІ ПРИКМЕТИ ПЕРВІСНОЇ АКРЕЦІЇ В ПРОТОПЛАНЕТНІЙ ТУМАННОСТІ?

Наведено структурно-мінералогічні та хімічні характеристики вуглистого ксеноліту із хондриту Кримка, в якому збереглися прикмети первісної полістадійної акреції мінерального пилу протопланетної туманності. Вперше знайдені гіпотетичні пухкі пилові кульки, із яких найімовірніше утворились хондри.

Утворення планет, зокрема Землі, безпосередньо пов'язані з ранніми етапами розвитку Сонячної системи. Що знаємо ми про її первісну речовину і чи збереглися її рештки в інших космічних тілах?

Жодна з існуючих гіпотез походження Сонячної системи не здатна повністю пояснити різноманіття фізико-хімічних процесів її еволюції та особливості функціонування планет, їх супутників, комет й інших малих тіл, зокрема астероїдів. Разом з тим дані астрофізики однозначно засвідчують, що субстратом для зародження зіркових систем є газопилові туманності Всесвіту. Фактично, саме з пилової компоненти туманностей, яка складена субмікронними і нанометричними аморфними та мінеральними зернами, а також продуктів їх взаємодії з газом утворюються планетні тіла зіркових систем. Отже, з'ясування умов утворення та еволюції планетної речовини неможливе без пошуку, ідентифікації і вивчення первісного мінерального пилу. На відміну від інших тіл Сонячної системи, недиференційовані метеорити є єдиними представниками ранніх етапів розвитку протопланетної туманності, які вміщують релікти первісного пилу у вигляді тонкозернистої речовини [4, 5, 9, 13, 15].

Тонкозерниста речовина вуглистих і нерівноважних звичайних хондритів належить до найскладніших і генетично важливих об'єктів дослідження. Вивчення зерен мікро- та нанометричних розмірів, складних полімінеральних асоціацій, а також неоднорідності хімічного складу мінералів знаходиться на межі або поза межами сучасних інструментальних можливостей дослідження. Тонкозерниста речовина є головним компонентом примітивної матриці недиференційованих хондритів, темних ксенолітів, у вигляді оболонок оточує окремі хондри, їх уламки і ксеноліти. У звичайних хондритах петрологічних типів 3 і 4 вона складена сумішшю тонких зерен переважно олівіну, піроксенів, меншою мірою аморфною силікатною фазою, плагіоклазом і окремими зернами нікелістого заліза й троїліту.

Одним із найважливіших досягнень космічної мінералогії та космохімії є виявлення в примітивній тонкозернистій речовині хондритів субмікронних і нанометричних досонячних зерен графіту, алмазу, муасаніту (SiC) та осборніту (TiN) [2]. Саме аномальне збагачення цих мінеральних зерен важкими ізотопами, яке неможливо пояснити жодним із відомих фізико-хімічних процесів фракціонування ізотопів у межах Сонячної системи, дало змогу припустити їх утворення в інших зіркових системах нашої галактики внаслідок вибуху наднових зірок. Об'ємна частка реліктових досонячних мінералів у тонкозернистій речовині примітивних хондритів сягає 1–3 % [1].

Ці дані космохімії повністю узгоджуються з даними сучасних астрофізичних досліджень зірок. Так, у результаті дослідження червоних гігантів за допомогою зіркових спектроскопів встановлено, що діяльність кисневого типу зірок породжує величезну кількість силікатного пилу, в той час як вуглецевий тип зірок генерує вуглецевий пил, складений графітом, алмазом і т. п. [11]. Таким чином, є всі підстави говорити про фундаментальність процесу мінералоутворення у Всесвіті, від зародження і еволюції мінералів у зіркових системах, у газопилових туманностях, первинних пилових згустках, материнських тілах метеоритів та планет до їх виникнення під час ендегенних і екзогенних процесів на планетах.

Одним із відомих нерівноважних звичайних метеоритів, які містять реліктову пилову компоненту протопланетної туманності, є хондрит Кримка (LL3.1) [1, 9, 15, 17–21]. Втім за даними оптичних, електронномікроскопічних і мікронзондових досліджень метеорита, не вся його тонкозерниста речовина належить безпосередньо до реліктів пилової компоненти. Здебільшого вона тою чи іншою мірою змінена процесами термального чи ударного метаморфізму [19–21] або представлена продуктами розкristалізації скла у скловмісних хондрах чи їх уламках. Тонкі дослідження будови та мінерального складу пилової оболонки однієї із хондр метеорита, які проведені за допомогою трансмісійного електронного мікроскопа [1], показали, що вона складається із олівінової основи, розмір зерен в якій близько 0,1 мкм, окремих уламків більших зерен олівіну (Fa₇₀₋₈₀) і низькокальцієвого піроксену, аморфного фельдшпатоїдного компонента, окремих оксидів заліза (магнетиту, гематиту).

Малозмінені релікти пилової компоненти відзначені нами в невеликих за розмірами ділянках матриці хондрита Кримка, в окремому випадку у вигляді жилки, особливості будови якої засвідчують заповнення пилом міжхондрового простору в материнському тілі хондрита [18], в пилових оболонках хондр і ксенолітів та в тонкозернистих ксенолітах. Із останніх найцікавішою є тонкозерниста речовина ксеноліту ВК13, вивчення якої дає змогу зробити важливі генетичні висновки щодо первісної акреції та механізму утворення хондр [18, 19].

Хондри є важливим компонентом хондритів, форма, структура, мінеральний, хімічний та ізотопний склад яких вказують на їх утворення в результаті розкristалізації краплин розплаву [7]. Водночас механізм утворення цих краплин залишається дискусійним. Серед існуючих гіпотез найімовірнішим є припущення про утворення хондр під час переплавлення пилової компоненти газопилової туманності в результаті високоенергетичних подій, типу численних мікроблискавок [14] або проходження ударної хвилі [3, 8]. При цьому встановлено, що термодинамічні вимоги такого процесу задовільнятимуться лише тоді, коли переплавлятимуться не окремі пилінки, а їх кулеподібні пористі агрегати, названі “dusty balls”. Ідея пошуку гіпотетичних “dustballs” існує з 1980 р. [6], але дослідники так і не знайшли їх у метеоритах. Знайдений нами в хондриті Кримка пиловий ксеноліт ВК13 має унікальну структуру, яка є першим структурно-мінералогічним свідченням механізму первісної акреції пилу і доказом існування пилових пухких кульок у ранній газопиловій туманності, як найімо-

вірніших попередників хондр. Враховуючи важливість знахідки ксеноліту для пізнання природи хондритів, зупинимось детальніше на особливостях його будови та складу [18].

Пиловий ксеноліт ВК13 складений переважно мікронними, субмікронними і нанометричними зернами олівіну, піроксенів, троїліту і нікелістого заліза. Однорідна суміш цих мінералів містить також окремі зерна та їх фрагменти розміром від одиниць до десятків мікрметрів олівіну, піроксенів, а також мікронні зерна рідкісних високотемпературних мінералів: шпінелі, гібоніту, Ті-фассаїту, перовскіту та анортиту ($Аn_{99}$). Всі мінерали ксеноліту мають перемінний склад, який змінюється від зерна до зерна або в межах великих зерен.

У ксеноліті наявні також окремі мікрохондри розміром менше 20 мкм, які складені нормативним олівіном або піроксеном. Враховуючи мізерну кількість мікрохондр у ксеноліті порівняно з великим об'ємом хондр у хондриті Кримка, можна дійти висновку, що процес їх утворення відбувався на мікромасштабному рівні, можливо, безпосередньо під час переплавлення окремих незначних за розміром скупчень мінерального пилу. Причому цей процес був не широкомасштабним, а здебільшого спорадичним. Не виключено, що саме електростатичний розподіл зарядів між силікатними зернами, які були у постійному русі, зумовив їх переплавлення. Такі мікрохондри спостерігали і в тонкозернистих оболонках хондр, що дало змогу дійти висновку щодо формування хондр саме в пиловому середовищі [10, 16].

Валовий хімічний склад ксеноліту ВК13 (див. таблицю) є типовим для тонкозернистої речовини хондритів і характеризується низькою аналітичною сумою (93,4 %), що обумовлено високою його пористістю і ймовірною наявністю С-вмісних фаз. Порівняно з непрозорою примітивною матрицею, тонкозерниста речовина ксеноліту збагачена сіркою, що свідчить про її сульфідизацію, значно нижчу концентрацію FeO і підвищений вміст MgO. Співвідношення SiO_2/MgO дає змогу класифікувати речовину ксеноліту як вуглисту.

На відміну від інших тонкозернистих утворень, які мають однорідну структуру, ВК13 характеризується "хондритовою" структурою, яку видно у відбитому світлі та у відбитих електронах. У полірованому шліфі він складається з округлих

Валовий хімічний склад (%) ксеноліту ВК13 та його текстурних одиниць (перераховано на 100 %)

Компонент	ВК13(402)	Округлі ділянки (40)	Оболонки (40)	Матриця (91)	Оболонка ВК13 (15)
Na ₂ O	0,73	0,51	0,40	0,64	0,25
MgO	23,2	24,9	23,4	24,2	22,2
SiO ₂	34,3	35,9	33,7	34,4	35,5
CaO	1,57	1,43	1,52	1,64	1,54
Al ₂ O ₃	2,10	2,21	2,11	2,25	1,76
P ₂ O ₅	0,54	0,60	0,40	0,45	0,28
K ₂ O	0,03	<0,02	<0,02	0,03	0,04
TiO ₂	0,10	0,09	0,10	0,10	0,09
Cr ₂ O ₃	0,52	0,49	0,40	0,47	0,43
MnO	0,28	0,27	0,25	0,27	0,35
FeO	33,6	32,4	34,9	32,7	36,1
Ni	1,39	0,68	1,09	1,23	1,29
S	1,60	0,55	1,61	1,54	0,17
Сума	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Аналітична сума	93,4	89,7	90,0	93,2	88,7
SiO ₂ /MgO	1,48	1,44	1,44	1,42	1,60

П р и м і т к а. Кількість аналізів наведено в дужках. Валовий хімічний склад [21] отримано розфокусованим електронним променем (70 мкм) на електронному мікросонді JEOL JXA-8600 MX.

тонкозернистих силікатних ділянок, які мають темне ядро і світлу оболонку в силікатній матриці, збагаченій металом і троїлітом. Деякі з таких округлих об'єктів мають три оболонки, які відрізняються за щільністю і товщиною. Розміри ядер змінюються в діаметрі від 200 до 800 мкм, а оболонок — від 70 до 200 мкм за товщиною.

Основні відмінності між ядрами, оболонками і матрицею ксеноліту пов'язані з їх пористістю, а також з відношенням силікати/(метал + сульфід), тобто з вмістом і розподілом непрозорих мінералів. На відміну від ядра, оболонки є щільнішими і містять більшу кількість непрозорих мінералів. Відносно високий вміст останніх зумовив вищу відбивну здатність оболонок в оптичному мікроскопі.

Згідно з валовим хімічним складом ядер та оболонок (див. таблицю), вони характеризуються низькою аналітичною сумою і відрізняються між собою за вмістом FeO, Ni і S. Оболонки містять вищі концентрації FeO, S, Ni, а також меншу кількість SiO₂, ніж ядра. Ці дані добре узгоджуються з мінеральним складом, а саме з підвищеним вмістом сульфідів і металу в оболонках. Крім того, співвідношення SiO₂/MgO дає змогу класифікувати і ядра, і оболонки як вуглисту речовину.

Ксеноліт облямований суцільною тоненькою силікатною оболонкою із значно меншою кількістю металу і троїліту. Її валовий склад (див. таблицю) відрізняється від складу ксеноліту пониженою аналітичною сумою, трохи вищою концентрацією FeO, Ni, меншим вмістом MgO і суттєво нижчим вмістом S. За співвідношенням SiO₂/MgO речовина оболонки хімічно близька до звичайних хондритів і повністю відповідає хондриту Кримка. Ці дані однозначно засвідчують, що тонкозерниста оболонка не є результатом окиснення речовини ксеноліта, а утворилася внаслідок налипання тонкого пилу з дещо відмінними хімічними характеристиками на поверхню ксеноліту в пиловому середовищі, збідненому сульфідами.

Наявність у ксеноліті високотемпературних, збагачених Ca і Al мінералів — досить рідкісних компонентів звичайних хондритів, але типових другорядних у вуглих хондритах [12], є додатковим мінералогічним індикатором належності ксеноліту ВК13 до речовини вуглистої типу.

Незвичайна тонкозерниста структура ксеноліту має фундаментальне значення для з'ясування умов її утворення в ранній протопланетній туманності. Спостереження округлих зональних ділянок у двох паралельних площинах ксеноліта вказує на те, що вони представлені тонкозернистими об'єктами, які мають в об'ємному вимірі сферичну форму і належать, найімовірніше, до первинних пухких скупчень силікатного пилу, тобто до "dustballs". Враховуючи також неоднорідний хімічний склад мінералів і головні мінералогічні та хімічні особливості ядра і оболонок, можна дійти висновку, що "хондритова" структура ксеноліту утворилася внаслідок багатостадійної акреції мінералогічно різних типів пилової компоненти протопланетної туманності. Крім того, вивчення мікророзподілу легких інертних газів показало значне збагачення первинним ²⁰Ne ксеноліту ВК13 порівняно з матрицею хондрита Кримка [22, 23]. Ці дані однозначно засвідчують, що ксеноліт є продуктом безпосередньої акреції пилової компоненти туманності. Враховуючи також вуглистий склад ксеноліту, з великою часткою ймовірності можна припустити наявність у ньому органічних сполук і досонячних зерен мінералів.

Отже, структурно-мінералогічні та хімічні дослідження вуглистої ксеноліту ВК13 з незвичайною "хондритовою" структурою тонкозернистої речовини дають змогу відтворити фізико-хімічні процеси в пиловому середовищі, яке складалося з криптористалічного силікатного пилу, незначної кількості зерен металу і сульфідів, а також фрагментів великих силікатних зерен, високотемпературних Ca,Al-багатих мінералів і мікрохондр [18, 19]. Зародження ксеноліту в протопланетній газопиловій туманності відбувалось у такій послідовності:

1) первісна акреція силікатного пилу з низькою швидкістю на поверхню більших за розмірами, переважно металевих зерен, що спричинило утворення акреційних пухких пилових кульок;

2) налипання на первісні силікатні кульки пилу, збагаченого металом і сульфідами, що було зумовлено зміною відношення силікат/(метал+сульфід) у пиловій компоненті або в часі, або в просторі; ритмічна зміна мінерального складу пилового середовища привела до утворення кількох оболонок на поверхні пухких пилових кульок;

3) м'яка акреція покритих оболонками пилових кульок, тонкозернистого силікатного пилу, метал-сульфідних зерен, мікрохондр і великих силікатних зерен з утворенням первинного пилового об'єкта вуглистою складу з послідовною його літифікацією;

4) ударна фрагментація первинного акреційного тіла, фрагменти якого з часом також акумулювали силікатний пил із навколишнього пилового середовища.

Після утворення акреційного тіла один із його фрагментів у вигляді пилового вуглисто ксеноліту ввійшов до складу материнського тіла хондрита Кримка в період агломерації з іншими головними компонентами протопланетної туманності — хондрами, ксенолітами, мінеральним пилом.

Отже, виняткове значення будови і складу унікального вуглисто ксеноліту ВК13 із метеорита Кримка полягає у збереженні ксенолітом на мікронному і нанометричному рівнях слідів перших етапів багатостадійної акреції космічної речовини. Будова ксеноліту має головні характеристики хондритової структури:

1) ксеноліт складається із сферичних об'єктів і пилової матриці;

2) основна частина металу і троїліту знаходиться в оболонках і матриці, а не в сферичних об'єктах.

Саме такі особливості дають можливість поставити риторичні запитання: Який генетичний зв'язок існує між сферичними пиловими об'єктами і хондрами? Чи є ці об'єкти гіпотетичними "dusty balls", з яких утворилися хондри?

Якщо обмежитися лише допланетним періодом еволюції мінеральної речовини Сонячної системи, то можна з упевненістю констатувати, що акреція є полістадійним процесом, який розпочинається з акреції найдрібніших пилових зерен на самих ранніх етапах еволюції газопилової туманності та закінчується агломерацією великих об'єктів, таких як різні кам'яні уламки і хондри на пізніх стадіях формування материнських тіл метеоритів. Яскравим підтвердженням цього є унікальні структурно-мінералогічні характеристики, які збереглись у вуглистом ксеноліті ВК13 із хондрита Кримка.

Автор вдячна Т.М. Горovenko за технічну допомогу в підготовці статті до друку.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Alexander C.M.O'D., Hutchison R., Barber D.J. Origin of chondrule rims and interchondrule matrices in unequilibrated ordinary chondrites // *Earth Planet. Sci. Lett.* — 1989. — **95**. — P. 187—207.
2. Anders E., Zinner E. Interstellar grains in primitive meteorites: Diamond, silicon carbide and graphite // *Meteoritics.* — 1993. — **28**. — P. 490—514.
3. Boss A.P., Graham J.A. Clumpy disk accretion and chondrule formation // *Icarus.* — 1993. — **106**. — P. 168—178.
4. Brearley A.J. Matrix and fine grained rims in the unequilibrated CO₃ chondrite, ALHA77307: Origins and evidence for diverse, primitive nebular dust components // *Geochim. Cosmochim. Acta.* — 1993. — **57**. — P. 1521—1150.
5. Brearley A.J. Nature of matrix in unequilibrated chondrites and its possible relationship to chondrules // *Chondrules and the Protoplanetary Disk.* — New York: Cambridge Univ. Press, 1996. — P. 137—151.
6. Clayton D.D. Chemical energy in cold-cloud aggregates: The origin of meteoritic chondrules // *Astrophys. J.* — 1980. — **239**. — P. 37—41.

7. *Hewins R.H.* Chondrules and the Protoplanetary Disk: An Overview // Chondrules and the Protoplanetary Disk. — New York: Cambridge Univ. Press, 1996. — P. 3–9.
8. *Hood L.L., Horanyi M.* The nebular shock wave model for chondrule formation // *Icarus*. — 1993. — **106**. — P. 179–189.
9. *Huss G.R., Keil K., Taylor G.J.* The matrices of unequilibrated ordinary chondrites: Implications for the origin and history of chondrites // *Geochim. Cosmochim. Acta*. — 1981. — **45**. — P. 33–51.
10. *Krot A.N., Rubin A.E.* Microchondrule-bearing chondrule rims: Constraints on chondrule formation // Chondrules and the Protoplanetary Disk. — New York: Cambridge Univ. Press, 1996. — P. 181–184.
11. *Lodders K., Fegley B.* The origin of circumstellar silicon carbide grains found in meteorites // *Meteoritics*. — 1995. — **30**. — P. 661–678.
12. *MacPherson G.J., Wark D.A., Armstrong J.T.* Primitive material surviving in chondrites: Refractory inclusions // *Meteorites and the Early Solar System*. — Tucson: Univ. of Arizona Press, 1988. — P. 746–807.
13. *Metzler K., Bischoff A.* Constraints on chondrite agglomeration from fine-grained chondrule rims // Chondrules and the Protoplanetary Disk. — New York: Cambridge Univ. Press, 1996. — P. 153–161.
14. *Morfill G., Spruit H., Levy E.H.* Physical processes and conditions associated with the formation of protoplanetary disks // *Protostars and Planets III*. — 1993. — P. 939–978.
15. *Nagahara H.* Matrices of type 3 ordinary chondrites — Primitive nebular records // *Geochim. Cosmochim. Acta*. — 1984. — **48**. — P. 2581–2595.
16. *Rubin A.E., Scott E.R.D., Keil K.* Microchondrule-bearing clast in the Piancaldoli LL3 meteorite; A new kind of type 3 chondrite and its relevance to the history of chondrules // *Ibid.* — 1982. — **46**. — P. 1763–1776.
17. *Semenenko V.P., Girich A.L.* Chondrule embryos or dusty spherules in the Krymka (LL3) chondrite // *Meteorit. Planet. Sci.* — 1999. — **34**. — A 106.
18. *Semenenko V.P., Bischoff A., Weber I., Perron K., Girich A.L.* Mineralogy of fine-grained material in the Krymka (LL3.1) chondrite // *Ibid.* — 2001. — **36**. — P. 1067–1085.
19. *Semenenko V.P., Girich A.L.* A variety of lithic fragments in the Krymka (LL3.1) chondrite // *Ibid.* — 2001. — **36**. — A 187.
20. *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**. — P. 455–475.
21. *Semenenko V.P., Jessberger E.K., Chaussidon M. et al.* Carbonaceous xenoliths in the Krymka LL3.1 chondrite: Mysteries and established facts // *Ibid.* — 2005. — **69**. — N 8. — P. 2165–2182.
22. *Vogel N., Baur H., Bischoff A. et al.* Microdistribution of light noble gases in primitive chondrites and implications for their accretionary history // *Meteorit. Planet. Sci.* — 2000. — **35**. — A 165–A 166.
23. *Vogel N., Baur H., Bischoff A. et al.* Microdistribution of the noble gases neon and argon in primitive chondrites and implications for their accretionary history // *Lunar Planet. Sci.* — Houston: Lunar and Planetary Institute, 2001. — T. 32. — P. 1841

The results of textural, mineralogical and chemical studying of the Krymka carbonaceous xenolith, which contains evidences of primary polystage accretion of mineral dust from the protoplanetary nebular, are given. Hypothetical fluffy “dusty balls”, which most probably belong to precursors of chondrules, are found for the first time.

Надійшла 29.03.2007