

УДК 523.681

**В.П. Семененко, А.Л. Гіріч, Н.В. Кичань, К.О. Шкуренко**

ДУ "Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України"  
03680, м. Київ-142, Україна, пр. Акад. Палладіна, 34а  
E-mail: cosmin@i.ua

## ОСОБЛИВОСТІ МІНЕРАЛОГІЇ ТА ПОХОДЖЕННЯ ВУГЛИСТОГО КСЕНОЛІТУ AL1 У ХОНДРИТІ ALLENDE (CV3)

Наведено результати структурно-мінералогічних та хімічних досліджень тонкозернистого силікатного ксеноліту AL1 у хондриті *Allende* (CV3). За валовим хімічним складом і співвідношенням SiO<sub>2</sub>/MgO ксеноліт належить до вуглистих хондритів. Основною мінералого-хімічною особливістю ксеноліту порівняно з хондритом в цілому, його матрицею та темними літичними включеннями є збіднення на високотемпературні мінерали, метал і сульфідні, а, відповідно, Ca, Ti, Al, S і Ni у валовому хімічному складі. Допускається належність ксеноліту до проточовини хондр і матриці метеорита. Наявність високопористих тонкозернистих ксенолітів у хондритах є ще одним доказом існування в поясі астероїдів крихких об'єктів, фізичні властивості яких не дозволяють їм самотійно проникнути через атмосферу і досягти поверхні Землі у вигляді метеоритів.

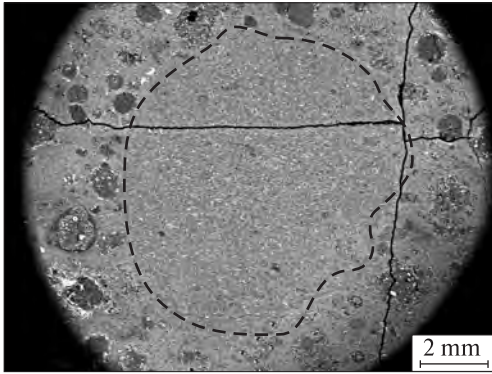
**Вступ.** Пошук та вивчення в метеоритах чужорідних літичних об'єктів, тобто ксенолітів, є пріоритетним напрямком сучасної мінералогії та космохімії. Саме дослідження таких об'єктів дозволяє отримати відомості про нові типи і різновиди космічної речовини, а, відповідно, і про допланетні фізико-хімічні умови їх формування. Ксеноліти присутні переважно в кам'яних метеоритах, а саме у вуглистих і нерівноважних звичайних хондритах, або в поліміктових брекчіях. Одним із найбільш відомих метеоритів, що вміщує ксеноліти, є український хондрит Кримка. Завдяки детальним дослідженням у ньому вперше були знайдені ксеноліти, які класифікуються як нові різновиди космічної речовини [2, 15, 16].

У даній роботі ми представляємо результати структурно-мінералогічних досліджень сірого тонкозернистого силікатного ксеноліту AL1, знайденого нами у хондриті *Allende*. На відміну від інших метеоритів, цей хондрит є одним із найбільш вивчених завдяки своїй масі (більше 2 т) [6] і належності до науково цінних зразків — вуглистих хондритів. Попередні дослідження метеорита [3, 6, 10] свідчать про наявність у ньому високотемпературних кон-

денсатів [13], тобто збагачених на Ca, Al і Ti мінералів, фрейдлінгів, досонячних зерен мінералів [9] і органічної речовини [8]. У метеориті також були діагностовані темні тонкозернисті ксеноліти, які ще називають включеннями або фрагментами. Всі вони за хімічним складом подібні до основної частини хондриту *Allende*, але відмінні за структурою [5–7, 11, 14], що дозволило класифікувати метеорит як геноміктову брекчію [3].

**Об'єкти та методи досліджень.** Сірий силікатний ксеноліт AL1 розміром 1,2 × 0,8 см був знайдений на темно-сірому сколі фрагментованого індивідуального зразка вагою близько 200 г, який зберігається у робочій колекції Комітету по метеоритах НАН України. З ксеноліту були відібрані невеликі уламки для електронно-мікроскопічного дослідження поверхні їх злому, а з фрагмента метеорита *Allende*, який вміщує ксеноліт, виготовлено полірований шліф.

Структурно-мінералогічні дослідження проведено за допомогою оптичного мікроскопа марки ПОЛАМ Р-312, а також сканувальних електронних мікроскопів марки JSM-6490LV та JSM-6060LA фірми Jeol, перший з яких обладнаний енергодисперсійним спектрометром (EDS) INCA Penta FETx3. Хімічний склад зерен мінералів ксеноліту визначено на мікро-



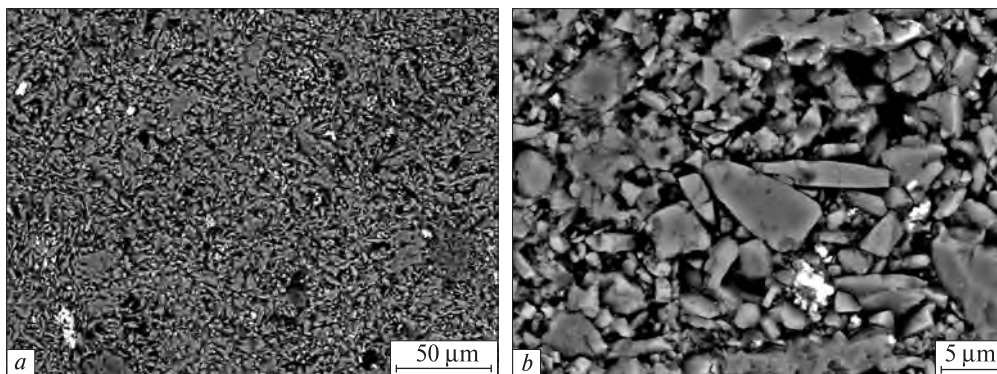
*Рис. 1.* Сканувальне електронно-мікроскопічне (SEM) зображення ксеноліту AL1 у полірованому шліфі хондриту *Allende*. Чітко видно відмінність будови ксеноліту від метеорита, що його вміщує. Пунктиром показано границі ксеноліту

*Fig. 1.* Scanning electron microscope (SEM) image of the xenolith AL1 in a polished section of the Allende chondrite. The textural distinctions of the xenolith and the meteorite host are clearly visible. Xenolith boundaries are shown by dotted lines

аналізаторі марки *JXA-8200* фірми *Jeol* в Технічному центрі НАН України (сила струму 10 нА, прискорювальна напруга 15 кВ, діаметр зонда 2 мкм, із використанням *ZAF* поправок). Електронно-мікроскопічне дослідження тонкозернистої речовини ксеноліту проводили без напilenня, а рентгеноспектральне — з вуглецевим напilenням полірованого шліфа. У зв'язку з високою пористістю силікатних зерен, особливо Са-піроксену і андрадиту, прецизійні дані щодо їх хімічного складу досить обмежені. Так, вміст файлітового компо-

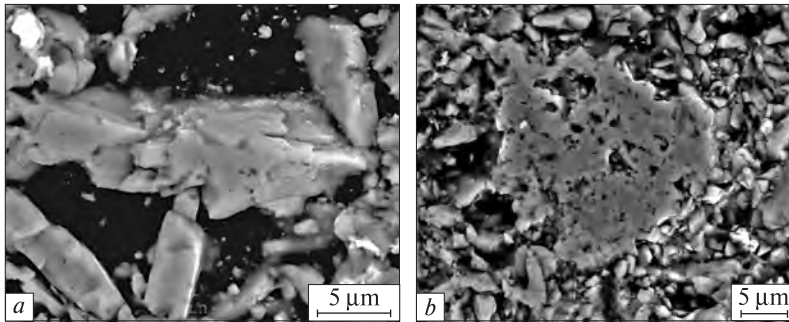
нента в олівіні хондр визначено лише для одного зерна. Валовий хімічний склад ксеноліту встановлено за допомогою розфокусованого зонда (діаметр 20 мкм) як середнє з 436 вимірів.

**Будова ксеноліту AL1.** У полірованому шліфі ксеноліт (рис. 1) має овальну форму і типову для тонкозернистої речовини хондритів однорідну пористу будову (рис. 2, *a, b*) і, відповідно до розмірів зерен, складається із трьох головних компонентів: нанорозмірних ( $\leq 1$  мкм), тонкозернистих ( $\leq 5$ ), які домінують, а також дугорядних великих зерен ( $\geq 5$ ) силікатів (рис. 3, *a, b*) і метал-сульфідних агрегатів (рис. 4). Серед тонкозернистої речовини відмічені поодинокі погано видимі силікатні хондри розміром  $\leq 500$  мкм та амебоподібні зерна Са-багатого піроксену, рідше — олівіну ( $\geq 50$  мкм). Хондри мають округлу форму, кристалічну або мікропорфирову будову, інколи оточені тоненькою оболонкою із субмікронних метал-сульфідних зерен. Переважна більшість метал-сульфідних асоціацій представлена видовженими агрегатами субмікронних зерен (рис. 4) і характеризується субпаралельним розташуванням у тонкозернистій речовині ксеноліту. Ксеноліт має грубозернисту оболонку шириною близько 50 мкм, складену округлими та видовженими зернами Са-багатого піроксену і андрадиту. Перший з них розташований переважно на внутрішній стороні оболонки, а другий — на зовнішній. Ксеноліт (рис. 2, *a, b*), а також більшість його зерен (рис. 3, *b*; 5, 6) характеризуються наявністю великої кількості пор і порожнин.



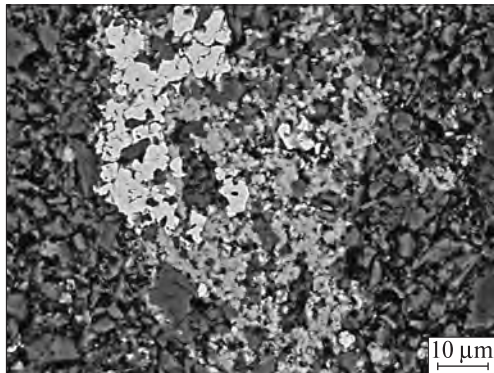
*Рис. 2.* SEM зображення однорідної пористої будови силікатного ксеноліту AL1: *a* — за невеликого збільшення. Тонкозерниста речовина ксеноліту вміщує окремі великі зерна силікатів. Сіре — олівін, Са-піроксен, світло-сіре — пентландит, біле — аваруйт, чорне — пори; *b* — за великого збільшення. Біле — пентландит, сіре — видовжені кристали олівіну і ксеноморфні зерна Са-піроксену, чорне — пори

*Fig. 2.* SEM images of the uniform porous texture of the silicate xenolith AL1: *a* — under moderate magnification. Fine-grained xenolith material contains individual coarse grains of silicates. Olivine and Ca-pyroxene are gray, pentlandite is light gray, avaruite is white, cavities are black; *b* — under high magnification. Pentlandite is white, elongate olivine crystals and xenomorphic Ca-pyroxene grains are gray, cavities are black



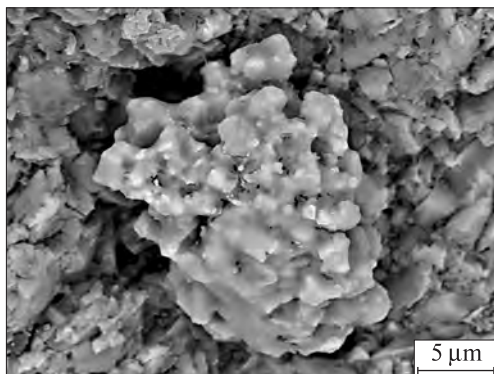
*Рис. 3.* SEM зображення великих силікатних зерен у тонкозернистому ксеноліті: *a* — недосконалий кристал олівіну ( $Fa_{30}$ ) в порожнині, біле — аваруїт; *b* — пористе зерно Са-піроксену

*Fig. 3.* SEM images of the coarse silicate grains within the fine-grained xenolith: *a* — imperfect olivine ( $Fa_{30}$ ) crystal within a cavity, avaruite is white; *b* — porous Ca-pyroxene grain



*Рис. 4.* SEM зображення агрегату тонких зерен аваруїту (біле) і пентландиту (світло-сіре) в силікатному ксеноліті

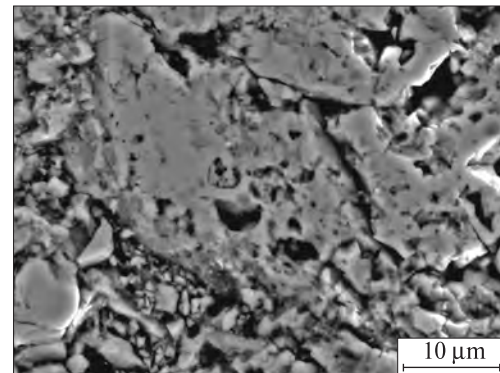
*Fig. 4.* SEM image of the agglomerate of fine avaruite (white) and pentlandite (light gray) grains within the silicate xenolith



*Рис. 5.* SEM зображення акреційного пористого агрегату нанометрових зерен пентландиту на поверхні злому ксеноліту AL1

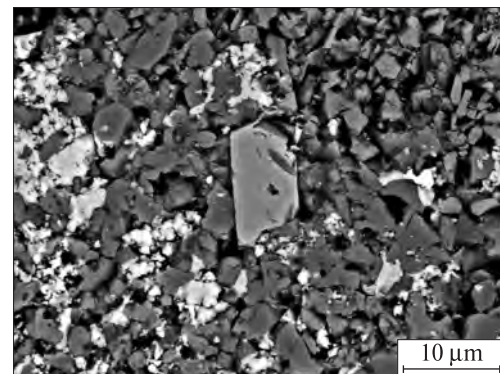
*Fig. 5.* SEM image of an accretional porous aggregate of pentlandite nanometric grains on a broken surface of the xenolith AL1

Особливості будови ксеноліту в полірованому шліфі підтверджуються результатами досліджень його будови на поверхні сколу. Згідно з ними ксеноліт складається переважно із мікронних силікатних зерен, пористих агрегатів округлих і неправильних за формою субмі-



*Рис. 6.* SEM зображення великого пористого зерна андрадиту, розташованого на контакті протохондри з тонкозернистою речовиною ксеноліту

*Fig. 6.* SEM image of a coarse porous andradite grain located on the boundary of a protochondrule with a fine-grained xenolith material



*Рис. 7.* SEM зображення кристала хроміту (мас. %:  $Cr_2O_3$  — 58,2;  $FeO$  — 33,3;  $Al_2O_3$  — 3,85;  $MgO$  — 1,51;  $V_2O_5$  — 0,77;  $TiO_2$  — 0,58 (у центрі фото)). Сіре — силікати, світло-сіре — пентландит, біле — аваруїт

*Fig. 7.* SEM image of the chromite crystal (in wt. %:  $Cr_2O_3$  — 58,2;  $FeO$  — 33,3;  $Al_2O_3$  — 3,85;  $MgO$  — 1,51;  $V_2O_5$  — 0,77;  $TiO_2$  — 0,58 (in the center of photo)). Silicates are gray, pentlandite is light gray, avaruite is white

кронних зерен, а також окремих великих зерен і кристалів призматичного або табличчастого габітусу. Важливою морфологічною ознакою пористих агрегатів є акреційна будова,



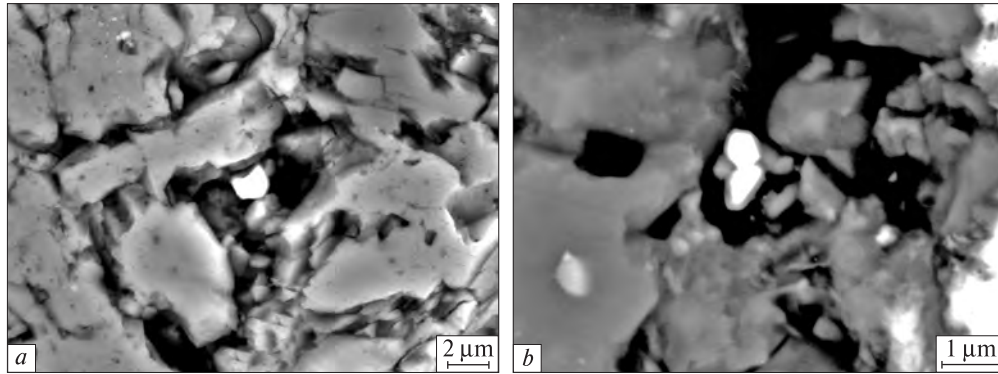


Рис. 8. СЕМ зображення кристала (а) та зростка субмікронних кристалів (b) аваруїту (біле), розташованих у порожнинах ксеноліту. Світло-сіре і сіре — силікати, чорне — порожнини

Fig. 8. SEM images of the avaruite (white) crystal (a) and joint submicrometer crystals (b) disposed within the xenolith cavities. Silicates are gray and light gray, cavities are black

яка утворилась внаслідок злипання субмікронних і нанометрових зерен.

Після трирічного зберігання полірованого шліфа в лабораторних умовах на його поверхні виростили численні голчасті кристали гетиту. Особливо активний ріст відбувся в ксеноліті, а також в тонкозернистій матриці хондриту, що свідчить про високу поверхневу активність саме мікро- і нанометрових зерен в агресивному земному середовищі.

**Мінеральний склад ксеноліту AL1** в порівнянні з хондритом *Allende* досить обмежений і

представлений в основному силікатами з чітким домінуванням олівіну над Са-піроксеном, другорядними нікелістим залізом (аваруїтом) і пентландитом. Як акцесорні мінерали виявлені хроміт, перовськіт, ільменіт, андрадит, нефелін, а в одній із хондр — апатит. На відміну від окремих кристалів олівіну, хроміту (рис. 7) і аваруїту (рис. 8, a, b), всі зерна мінералів мають неправильну або округлу форму. Найбільша ступінь ксеноморфізму характерна для зерен Са-піроксену, андрадиту, аваруїту та пентландиту. Електронно-мікроскопічне досліджен-

Таблиця 1. Хімічний склад силікатів у ксеноліті AL1 увуглистого хондриту *Allende*, мас. %

Table 1. Chemical composition of silicates within the xenolith AL1 of the Allende carbonaceous chondrite, wt. %

Компонент	Олівін		Са-багатий піроксен		Нефелін	
	min-max (37)	середнє	min-max (8)	середнє	min-max (2)	середнє
SiO <sub>2</sub>	35,6—42,8	40,0	49,6—55,4	53,0	46,7—48,6	47,7
TiO <sub>2</sub>	Н. в.—0,09	0,02	0,15—0,67	0,31	0,02—0,03	0,02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Н. в.—0,38	0,08	1,69—7,19	3,34	34,9—35,4	35,1
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Н. в.—0,25	0,06	0,05—1,51	0,65	0,01—0,09	0,05
MgO	27,5—55,1	45,1	15,7—23,9	19,9	0,17—0,19	0,18
FeO	0,43—34,7	13,7	0,81—3,88	2,13	1,20—1,49	1,34
MnO	Н. в.—0,37	0,12	0,02—1,42	0,44	Н. в.—0,02	0,01
CaO	Н. в.—0,54	0,16	16,0—23,8	18,9	0,70—0,82	0,76
Na <sub>2</sub> O	Н. в.—0,09	0,01	Н. в.—0,09	0,03	13,3—15,2	14,2
K <sub>2</sub> O	Н. в.—0,02	Н. в.	Н. в.—0,02	Н. в.	0,59—0,78	0,68
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Н. в.—0,08	0,01	Н. в.—0,03	0,01	0,01—0,05	0,03
Сума		99,2		98,7		100,1
Fa	0,44—41,5	14,9				
Fo	58,5—99,6	85,1				
Fs			1,26—6,94	3,51		
En			48,3—66,1	57,1		
Wo			31,8—49,2	39,4		

Примітка. У дужках вказана кількість аналізів; Н. в. — не визначено.

Note. The number of analyses is in brackets; Н. в. is not determined.

ня поверхні сколу ксеноліту показало, що ксеноморфізм і висока пористість пентландит-аваруїтових асоціацій зумовлені їх акреційною будовою (рис. 5). Водночас необхідно зазначити, що поодинокі кристали аваруїту або їх зростки виявлені лише в порожнинах ксеноліту (рис. 8, *a, b*).

За даними мікрозондових досліджень, хімічний склад всіх мінералів змінюється від зерна до зерна, а також у межах зерен, що типово для мінералів, які вміщують нанорозмірні включення. Олівін характеризується варіацією вмісту фаялітового компонента (Fa) від майже чистого форстериту до олівіну з 41,5 мол. % Fa (рис. 9; табл. 1). Середній склад зерен у тонкозернистій речовині ксеноліту відповідає  $Fa_{14,9}$ , тобто свідчить про домінування високотемпературного олівіну. Склад одного із зерен олівіну у хондрі відповідає  $Fa_{18,9}$ . Піроксен представлений лише Са-збагаченими високотемпературними різновидами (табл. 1) і характеризується більш високим вмістом En і меншим Wo в ксеноліті ( $Fs_{1,26-6,94}En_{48,3-66,1} \times Wo_{31,8-49,2}$ ), ніж в оболонці ( $Fs_{8,84-28,2} \times En_{16,5-42,9}Wo_{42,4-55,3}$ ). В одному випадку діагностовано Са-піроксен ( $Fs_{17}En_{36}Wo_{47}$ ), який оточує порожнину розміром  $200 \times 80$  мкм і вміщує мікронні кубічні кристали перовськіту, хімічний склад яких, згідно з енергодисперсійними дослідженнями, відповідає, мас. %:  $TiO_2 - 52,6$ ;  $CaO - 31,5$ ;  $FeO - 7,52$ ;  $SiO_2 - 4,46$ ;  $MgO - 2,07$ ;  $Al_2O_3 - 1,02$ ;  $SO_3 - 0,39$ ;  $CoO - 0,39$ . Враховуючи, що розмір включень перовськіту становить  $\leq 3$  мкм, наявність в ньому Fe, Si, Mg, Al, S і Co зумовлена переважно аналітичним забрудненням Са-піроксеном. Андрадит є одним із головних мінералів оболонки і акцесорним — ксеноліту, де він виявлений на контакті тонкозернистої речовини з протохондрою (рис. 6). Через високу пористість зерен андрадиту прецизійний аналіз отримано лише для одного зерна, розмішеного в оболонці ксеноліту, мас. %:  $SiO_2 - 35,6$ ;  $CaO - 32,3$ ;  $Fe_2O_3 - 30,0$ ;  $TiO_2 - 0,06$ ;  $Al_2O_3 - 0,05$ ;  $MgO - 0,04$ ; *сума* — 98.

Аваруїт має змінний склад (табл. 2) і характеризується тенденцією до зворотної кореляції вмісту Ni і Co (рис. 10). Наявність в складі S, Ca і Si зумовлена аналітичним забрудненням навколишніми мінералами. В більшості випадків метал асоціює з пентландитом (табл. 2), вміст Co в якому також зменшується зі збільшенням вмісту Ni (рис. 11). На відміну

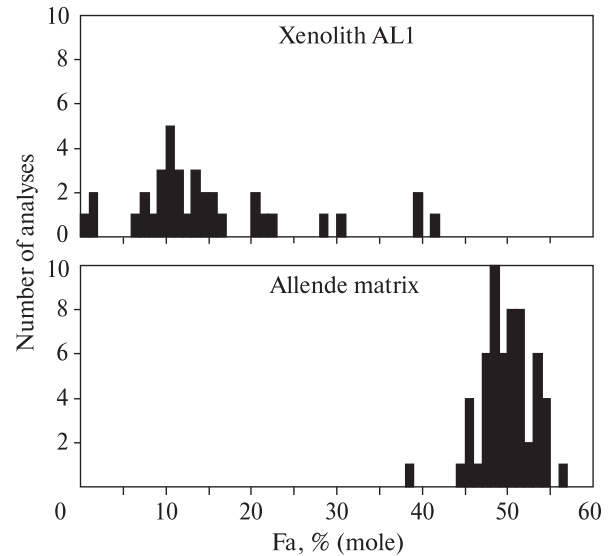


Рис. 9. Гістограма вмісту фаялітового компонента (мол. %) в олівіні ксеноліту AL1 та матриці хондриту Allende

Fig. 9. Histogram of olivine composition (mole percent Fa) within the xenolith AL1 and a matrix of the Allende chondrite

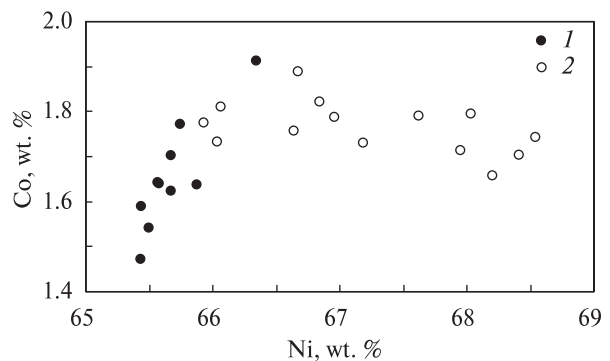


Рис. 10. Вміст Ni і Co (в мас. %) в аваруїті ксеноліту AL1 (2) та матриці хондриту Allende (1)

Fig. 10. Content of Ni and Co (wt. %) in avaruite within the xenolith AL1 (2) and a matrix of the Allende chondrite (1)

від основної частини хондриту Allende, у ксеноліті не було знайдено троїліту.

Нефелін асоціює з олівіном і трапляється досить рідко. Через пористість і дрібні розміри прецизійні аналізи було отримано тільки для двох зерен (табл. 1). Акцесорні зерна хроміту (рис. 7) та ільменіту діагностовано в силікатній речовині ксеноліту, а апатиту — в хондрі. Мікронні розміри зерен ільменіту і апатиту не дозволили коректно визначити їх хімічний склад.

**Валовий хімічний склад ксеноліту AL1** характеризується систематично низькою аналітичною сумою, що є типовим для тонкозер-

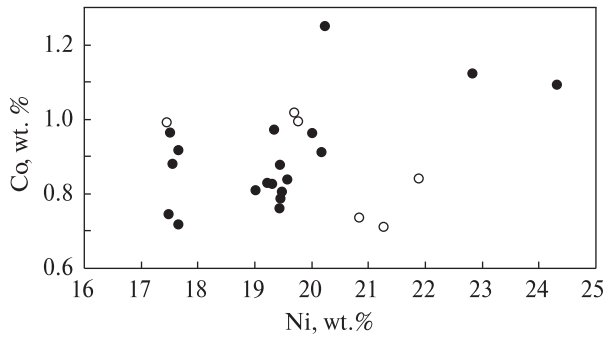


Рис. 11. Вміст Ni і Co (в мас. %) у пентландиті ксеноліту AL1 та матриці хондриту Allende. Умовні позначення див. на рис. 10

Fig. 11. Content of Ni and Co (wt. %) in pentlandite within the xenolith AL1 and a matrix of the Allende chondrite. Legend see on the Fig. 10

нистої пористої речовини примітивних хондритів, низьким вмістом S, Ni, а також відносно низьким значенням співвідношення FeO/(FeO + MgO) (табл. 3). Високий стандарт відхилення від середніх значень для Mg, Al, Ca, Fe і Si вказує на хімічну і мінералогічну неоднорідність ксеноліту на рівні 20 мкм електронного зонда. За співвідношенням SiO<sub>2</sub>/MgO (1,37) ксеноліт відповідає вуглистим хондритам (1,42 ± 0,05) [17].

**Прикмети ударного метаморфізму** в ксеноліті на макроскопічному рівні представлені субпаралельним розташуванням метал-сульфідних

Таблиця 2. Хімічний склад нікелістого заліза і сульфідів в ксеноліті AL1 вуглистої хондриту Allende, мас. %  
Table 2. Chemical composition of nickel-iron and sulphide within the xenolith AL1 of the Allende carbonaceous chondrite, wt. %

Компонент	Аваруїт		Пентландит	
	min-max (14)	середнє	min-max (6)	середнє
Fe	29,8—31,1	30,5	43,1—46,5	44,2
Ni	65,9—68,6	67,2	17,5—21,9	20,2
Co	1,66—1,89	1,76	0,71—1,02	0,88
Cu	Н. в.—0,13	0,04	0,01—0,17	0,08
Cr	0,02—0,14	0,06	0,02—0,16	0,06
S	Н. в.—0,08	0,03	33,8—35,1	34,3
P	Н. в.—0,02	Н. в.	Н. в.—0,03	0,01
Si	Н. в.—0,04	0,03	0,02—0,05	0,03
Ca	Н. в.—0,13	0,03	Н.в.—0,11	0,04
Сума		99,7		99,8

П р и м і т к а. У дужках вказана кількість аналізів; Н. в. — не визначено.

Note. The number of analyses is in brackets; Н. в. is not determined.

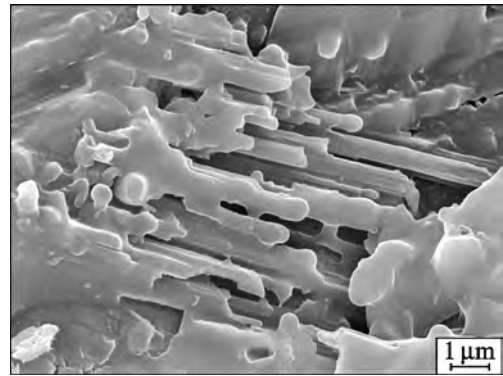


Рис. 12. SEM зображення ниткоподібних кристалів Са-піроксену в одній із порожнин, стінки якої покриті силікатним склом

Fig. 12. SEM image of the Ca-pyroxene fibrous crystals within a cavity with walls covered by silicate glass

агрегатів. Інші структури ударного метаморфізму діагностуються лише на електронно-мікроскопічному рівні. Вони представлені головним чином скульптурами деформації та плавлення. Як показало електронно-мікроскопічне дослідження поверхні скола ксеноліту, окремі ділянки аморфізовані, тобто вкриті тонким шаром силікатного скла. На призматичних гранях великих кристалів олівину і Са-піроксену відмічені деформації зсуву за спайністю мінералів, а на поверхні зерен — поодинокі високотемпературні бризки розплаву, нанорозмірні пори та включення. Наявність у порожнинах ксеноліту субмікронних ниткоподібних кристалів Са-піроксену (рис. 12), а також кристалів аваруїту (рис. 8, a, b) пов'язана з їх ростом, найімовірніше, внаслідок ударного метаморфізму в постагломеративний період еволюції материнського тіла хондриту Allende.

**Природа ксеноліту AL1.** Від основної частини хондриту Allende [3, 6, 10, 14] ксеноліт AL1 відрізняється наступними характеристиками: 1) сірим кольором; 2) однорідною тонкозернистою будовою; 3) низьким вмістом хондр і меншими їх розмірами; 4) меншим різноманіттям мінералів, а саме відсутністю троїлиту й агрегатів Са, Al-збагачених мінералів, що зумовило помітне збіднення його на тугоплавкі елементи — Са, Ti, Al, меншим вмістом нікелістого заліза та пентландиту, а, відповідно, Ni і S у валовому хімічному складі (табл. 3); 5) більш активним земним вивітрюванням, яке зумовлено нанометровими розмірами більшості зерен, що його складають, і підвищеною пористістю.

До матриці хондриту *Allende* вивчений ксеноліт подібний за структурою, але частково відмінний за мінеральним і хімічним складом [3, 6, 12]. Збіднення ксеноліту на метал і сульфід, а також обмежена кількість високотемпературних мінералів зумовили нижчі значення концентрації S, Ca, Ti, Cr і злегка Al та Ni (табл. 3). На відміну від матриці ксеноліт характеризується більшою хімічною неоднорідністю олівіну й аваруту, що вказує на нижчу ступінь метаморфізму. Середній хімічний склад мінералів також інший. Так, нижчий вміст Fe в олівіні ксеноліту (рис. 9) зумовлений нижчим ступенем окиснення силікатів (найімовірніше, ще в доагломераційний період), а в аваруті (рис. 10) — значним виносом Fe внаслідок вивітрювання на Землі, що підтверджується також відсутністю прямої кореляції Co/Ni в металі. Нижче значення FeO/(FeO + MgO) (табл. 3) підтверджує, що речовина ксеноліту є менш окисненою, ніж матриця хондриту. Будова і мінеральний склад грубозернистої силікатної оболонки свідчать про те, що вона також утворилась ще в доагломераційний період. Часткове окиснення

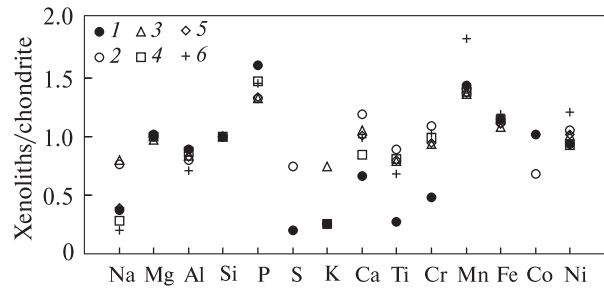


Рис. 13. Розповсюдженість основних елементів у ксенолітах хондриту *Allende*, нормалізована до Si та валового хімічного складу [10] хондриту. Ксеноліти: 1 — AL1, 2 — DI [6], 3 — 4294 [11], 4 — 4301 [11], 5 — 4320 [11], 6 — 4314 [11]

Fig. 13. Abundances of main elements within the Allende chondrite xenoliths normalised to Si and to chondrite [10] bulk composition. Xenoliths: 1 — AL1, 2 — DI [6], 3 — 4294 [11], 4 — 4301 [11], 5 — 4320 [11], 6 — 4314 [11]

Са-багатого піроксену в андрадит [7] могло відбуватись як під час агломерації в більш окиснювальних умовах, так і після агломерації в материнському тілі внаслідок реакції з мінералами матриці метеорита *Allende*. Різні значення SiO<sub>2</sub>/MgO у валовому хімічному складі (1,37 і 1,55 відповідно) вказує на різні

Таблиця 3. Валовий хімічний склад (мас. %) ксеноліту AL1 та текстурних складових вуглисто хондриту *Allende*, перерахований на 100 %

Table 3. Bulk composition (wt. %) of the xenolith AL1 and textures constituents of the Allende carbonaceous chondrite, recalculated to 100 %

Компонент	AL1 (436)	Хондрит <i>Allende</i> <sup>1</sup>	Матриця хондриту <sup>2</sup>	Темні включення хондриту				
				DI <sup>2</sup>	4294 <sup>3</sup>	4301 <sup>3</sup>	4320 <sup>3</sup>	4314 <sup>3</sup>
SiO <sub>2</sub>	33,7	34,2	33,1	33,2	34,4	33,8	34,0	33,3
TiO <sub>2</sub>	0,04	0,15	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12	0,10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,88	3,27	3,07	2,54	2,75	2,81	2,70	2,26
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,25	0,53	0,55	0,56	0,50	0,52	0,50	0,53
MgO	24,7	24,5	21,4	23,8	24,0	24,2	24,5	23,9
FeO	34,1	30,3	34,2	32,9	33,0	34,3	33,4	35,1
MnO	0,27	0,19	0,22	0,26	0,26	0,26	0,26	0,34
CaO	1,68	2,57	2,67	2,98	2,72	2,15	2,58	2,48
Na <sub>2</sub> O	0,17	0,46	0,44	0,34	0,37	0,13	0,18	0,09
K <sub>2</sub> O	0,01	0,04	0,03	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,38	0,24	0,25	0,31	0,32	0,35	0,32	0,34
Ni	1,31	1,42	1,53	1,45	1,44	1,30	1,44	1,67
Co	0,06	0,06	0,08	0,04	—	—	—	—
S	0,42	2,09	2,40	1,52	—	—	—	—
Сума	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Сума аналітична	81,5	100,2	100,1	100,6	97,6	96,9	98,1	95,9
FeO/(FeO + MgO)	0,58	0,55	0,61	0,58	0,58	0,59	0,58	0,59
SiO <sub>2</sub> /MgO	1,37	1,39	1,55	1,40	1,43	1,40	1,39	1,39

Примітка. У дужках вказана кількість аналізів; <sup>1</sup> — дані [10], <sup>2</sup> — дані [6] та <sup>3</sup> — дані [11], перераховані на 100 %. Note. The number of analyses is in brackets; <sup>1</sup> — data [10], <sup>2</sup> — data [6] and <sup>3</sup> — data [11], recalculated to 100 %.

хімічні типи речовини, тобто на належність матриці до звичайних, а ксеноліту, як і метеорита в цілому, — до вуглистих хондритів.

За структурою, мінеральним і валовим хімічним складом ксеноліт *AL1* найбільш подібний до темних літичних ксенолітів хондриту *Allende* [5—7, 11, 14], частина з яких також характеризується наявністю грубозернистої піроксен-андрадитової оболонки [7]. Його мінералогічною особливістю є збіднення на високотемпературні мінерали, метали і сульфіди. Порівняння валового хімічного складу (табл. 3) і нормалізованої до загальної частини хондриту розповсюдженості елементів у ксенолітах хондриту *Allende* (рис. 13) свідчить в цілому про їх подібність, за винятком таких елементів, як Са, Ті, Сг та S, на які ксеноліт *AL1* є помітно збідненим.

**Висновки.** Структурно-мінералогічні та хімічні характеристики ксеноліту *AL1* вказують на його належність до нового різновиду вуглистих ксенолітів, що виявлені в метеоритах. Тим не менше, мінералогічна і хімічна відповідність ксеноліту *AL1* хондриту *Allende* та його складовим за наявності структурних відмінностей дозволяють зробити припущення щодо їх генетичного зв'язку. Не виключено, що тонкозерниста речовина ксеноліту є проторечовиною, тобто акреційним реліктом пилової компоненти протопланетної туманності, із якої внаслідок багатостадійних і поліхронних процесів фізико-хімічної трансформації утворились хондри і матриця метеорита. Як окрема текстурна складова ксеноліт виник раніше, ніж материнське тіло хондриту *Allende*. На відміну від останнього, він утворився в менш окиснювальному газо-пиловому середовищі, яке в основному було збіднене на метал-сульфідний і високотемпературний мінеральний пил, а також хондри. Ця відмінність може мати як хронологічний, так і просторовий характер. Хоча речовина хондриту *Allende* в цілому має більш складну доземну історію, її хімічна спорідненість із ксенолітом *AL1* підтверджує висновок попередніх досліджень [3] про належність метеорита до геномікових брекчій.

Одна із характерних особливостей ксеноліту *AL1* та хондриту *Allende* в цілому зумовлена підвищеною пористістю, яка пов'язана, найімовірніше, з їх акреційною природою. Як показало проведене нами електронно-мікроскопічне дослідження сколків ксеноліту, таку ж

природу пористості мають аваруйт-пентландитові та силікатні агрегати субмікронних і нанометрових зерен. Водночас залишається загадкою природа пористості амебоподібних та ксеноморфних зерен мінералів, головним чином Са-піроксену і андрадиту, яка може бути зумовлена специфічними умовами мінералоутворення в космосі.

Необхідно відмітити, що великий розмір ксенолітів хондриту *Allende*, їх пористість, а також підвищена крихкість є ще одним аргументом на користь нашого припущення [4] про існування в поясі астероїдів тонкозернистих силікатних об'єктів, фізичні характеристики яких не дозволяють їм проникнути через атмосферу і потрапити на Землю у вигляді окремих метеоритів. Можливо, саме з такими тілами і пов'язане Тунгуське явище, яке характеризується потужною ударною хвилею і відсутністю вагомих речовинних залишків у районі падіння. Політ і фрагментація в атмосфері Землі високопористих тонкозернистих тіл здатні спровокувати потужну ударну хвилю і як наслідок — розсіяння на великій площі субмікронних і нанометрових силікатних зерен, які, на жаль, неможливо ні фізично, ні хімічно відокремити від їх земних аналогів. До речі, результати вивчення спектрів відбиття поверхні астероїдів [1] також вказують на існування в поясі астероїдів не лише материнських тіл метеоритів, а і невідомих раніше літичних об'єктів.

*Автори щиро вдячні В.Б. Соболеву, В.М. Сливінському і Д.П. Дьоменку за технічну допомогу у проведенні мікрондових та електронно-мікроскопічних досліджень.*

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Бельська І.М. Оптичні властивості поверхонь астероїдів, кентаврів та тіл поясу Койпера : Автореф. дис. ... д-ра фіз.-мат. наук. — К., 2007. — 30 с.
2. Гірч А.Л., Семененко В.П., Бішофф А., Кичань Н.В. Мінералогія силікатного пористого ксеноліту в хондриті Кримка (LL3.1) // Зап. Укр. мінерал. т-ва. — 2006. — 3. — С. 41—44.
3. Додд Р.Т. Метеориты : петрология и геохимия. — М. : Мир, 1986. — 384 с.
4. Семененко В.П., Шаркин О.П., Гирич А.Л. Высокопористые фрагменты в хондрите Саратов (L4) // Геохимия. — 1992. — № 6. — С. 881—892.
5. Bischoff A., Palme H., Spettel B. et al. The chemical composition of dark inclusions from the Allende meteorite (abstract) // Lunar Planet. Sci. Conf. XIX. — 1988. — P. 88—89.



6. Clarke R.S., Jarosewich E., Mason B. et al. The Allende, Mexico, meteorite shower // *Smithsonian Contribs Earth Sci.* — 1970. — No 5. — P. 1—53.
7. Fruland R.M., King E.A., McKay D.S. Allende dark inclusions // *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.* 9<sup>th</sup>. — 1978. — P. 1305—1329.
8. Gilmour I. Structural and isotopic analysis of organic matter in carbonaceous chondrites // *Treatise on Geochemistry* / Eds H.D. Holland, K.K. Turekian. — Elsevier Ltd., 2004. — Vol. 1. — P. 269—290.
9. Huss G.R., Lewis R.S. Presolar diamond, SiC, and graphite in primitive chondrites: Abundances as a function of meteorite class and petrologic type // *Geochim. et cosmochim. acta.* — 1995. — **59**. — P. 115—160.
10. Jarosewich E., Clarke R.S., Barrows J.N. The Allende meteorite reference sample // *Smithsonian Contribs Earth Sci.* — 1987. — No 27. — P. 1—49.
11. Johnson C.A., Prinz M., Weisberg M.K. et al. Dark inclusions in Allende, Leoville, and Vigarano: Evidence for nebular oxidation of CV3 constituents // *Geochim. et cosmochim. acta.* — 1990. — **54**. — P. 819—830.
12. Krot A.N., Scott E.R. D., Zolensky M.E. Mineralogical and chemical modification of components in CV3 chondrites: Nebular or asteroidal processing? // *Meteoritics.* — 1995. — **30**. — P. 748—775.
13. MacPherson G.J. Calcium-Aluminum-rich inclusions in chondritic meteorites // *Treatise on Geochemistry* / Eds H.D. Holland, K.K. Turekian. — Elsevier Ltd., 2004. — Vol. 1. — P. 201—246.
14. McSween H.Y. Petrographic variations among carbonaceous chondrites of the Vigarano type // *Geochim. et cosmochim. acta.* — 1977. — **41**. — P. 1777—1790.
15. Semenenko V.P., Girich A.L., Nittler L.R. An exotic kind of cosmic material: Graphite-containing xenoliths from the Krymka (LL3.1) chondrite // *Ibid.* — 2004. — **68**. — P. 455—475.
16. 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**. — P. 2165—2182.
17. Van Schmus W.R., Wood J.A. A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites // *Ibid.* — 1967. — **31**. — P. 745—765.

Надійшла 29.05.2012

*В.П. Семененко, А.Л. Гиріч,  
Н.В. Кичань, К.А. Шкуренко*

#### ОСОБЕННОСТИ МИНЕРАЛОГИИ И ПРОИСХОЖДЕНИЯ УГЛИСТОГО КСЕНОЛИТА AL1 В ХОНДРИТЕ ALLENDE (CV3)

Приведены результаты структурно-минералогических и химических исследований тонкозернистого силикатного ксенолита AL1 хондрита *Allende* (CV3). По валовому химическому составу и отношению SiO<sub>2</sub>/MgO ксенолит принадлежит к углистым хондритам. Основной минералогический особенностью ксенолита по сравнению с хондритом в целом, его матрицей и темными литическими включениями является обеднение высокотемпературными минералами, металлом и сульфидами, а, соответственно, Ca, Ti, Al,

S и Ni в валовом химическом составе. Допускается принадлежность ксенолита к протоматериалу хондритной матрицы метеорита. Наличие высокопористых тонкозернистых ксенолитов в хондритах — это еще одно доказательство существования в поясе астероидов хрупких объектов, физические свойства которых не позволяют им самостоятельно проникнуть через атмосферу и достичь поверхности Земли в виде метеоритов.

*V.P. Semenenko, A.L. Girich,  
N.V. Kychan, K.O. Shkurenko*

#### THE FEATURES OF MINERALOGY AND ORIGIN OF THE CARBONACEOUS XENOLITH AL1 IN THE ALLENDE (CV3) CHONDRITE

The results of structural, mineralogical and chemical studies of the fine-grained silicate xenolith AL1 of the Allende (CV3) chondrite are given. The xenolith is gray in a colour and consists of three main components, which differ in a grain size: major nanometric, fine, and minor coarse grains of silicates and metal-sulphide aggregates. Rare chondrules and large amoeboid porous silicate grains are present. The xenolith is characterized by a distinct lineation of opaque phases and is surrounded by a coarse-grained silicate rim. The major minerals are olivine (Fa<sub>0.5–41.5</sub>, mean Fa<sub>14.9</sub>) and Ca-rich pyroxene (Fs<sub>1.3–6.9</sub>En<sub>48.3–66.1</sub>Wo<sub>31.8–49.2</sub>, mean Fs<sub>3.5</sub>En<sub>57.1</sub>Wo<sub>39.4</sub>), minor are avaruite (Ni — 65.9—68.6 wt. %, Co — 1.66—1.89), pentlandite (Ni — 17.5—21.9 wt. %, Co — 0.71—1.02). Accessory phases include nepheline, chromite, ilmenite and apatite. The rim contains Ca-rich pyroxene (Fs<sub>8.84–28.2</sub>En<sub>16.5–42.9</sub>Wo<sub>42.4–55.3</sub>) and andradite, wt. %: SiO<sub>2</sub> — 35.6, CaO — 32.3, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 30.0, TiO<sub>2</sub> — 0.06, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 0.05, MgO — 0.04, MnO — 0.02, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> — 0.02, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 0.01, total 98.1. A bulk chemical composition measured by electron microprobe and recalculated to 100 wt. % corresponds to, wt. %: SiO<sub>2</sub> — 33.7, FeO — 34.1, MgO — 24.7, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 2.88, CaO — 1.68, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> — 0.38, MnO — 0.27, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 0.25, Na<sub>2</sub>O — 0.17, TiO<sub>2</sub> — 0.04, K<sub>2</sub>O — 0.01, Ni — 1.31, S — 0.42, Co — 0.06; FeO/(FeO + MgO) = 0.58; SiO<sub>2</sub>/MgO = 1.37. According to the last ratio the xenolith is classified as a carbonaceous chondrite. In general the mineralogical and chemical composition of the studied object is similar to that of other dark inclusions. At the same time the main differences between the xenolith AL1 and the bulk chondrite, its matrix and dark inclusions exist considering the remarkably lower content of high-temperature minerals, metal and sulfide, and Ca, Ti, Al, S and Ni in the bulk chemical composition accordingly. It is supposed that in contrast to the Allende parent body the xenolith AL1 was formed in a less oxidizing environment, which probably was depleted in metals, sulphides, high temperature minerals and chondrules. The distinctions could have both a chronological and spatial character. Belonging of the xenolith material to a precursor of chondrules and a matrix of the meteorite is not excluded. The presence of high porous fine-grained xenoliths in chondrites is an additional evidence to the existence in the asteroid belt of fragile objects with physical properties, which do not allow them to penetrate through an atmosphere and reach the Earth as meteorites.