

В. П. Семененко, А. Л. Гіріч, Н. В. Кичань

Тонкозернистий ксеноліт AL1 у хондриті Allende (CV3): мінералогія та походження*(Представлено академіком НАН України Е. В. Соболевичем)*

Наведено результати структурно-мінералогічних та хімічних досліджень тонкозернистого силікатного ксеноліта AL1 у хондриті Allende (CV3). За валовим хімічним складом і відношенням SiO₂/MgO ксеноліт відноситься до вуглистих хондритів. Зменшений вміст високотемпературних мінералів, металу й сульфїду, а відповідно Ca, Al, Ti й Ni у валовому хімічному складі є основною характеристикою, за якою ксеноліт відрізняється від хондрита в цілому, його матриці та темних включень. Припускається належність ксеноліта до проторечовини хондр і матриці метеорита. Наявність пористих тонкозернистих ксенолітів у хондритах є ще одним доказом існування в поясі астероїдів крижких об'єктів, фізичні властивості яких не дозволяють самостійно проникнути через атмосферу і приземлятися у вигляді метеоритів.

Мексиканський хондрит Allende, який випав у 1969 р. у вигляді кам'яного дощу загальною масою понад 2 т [1], є одним із найбільш вивчених метеоритів. Повнота його вивчення зумовлена як належністю до вуглистих хондритів (в яких збереглися прикмети ранніх фізико-хімічних процесів у протопланетній туманності), так і доступністю зразків для дослідження. Досить відзначити, що для визначення загального хімічного складу хондрита було використано безпрецедентно велику для метеоритів масу — 4 кг [2]. Дослідження мінералогічних, хімічних та ізотопних характеристик метеорита [3] на сучасному інструментальному ґрунті сприяло новим знахідкам та доскональному вивченню високотемпературних конденсатів [4], зокрема збагачених на Ca, Al й Ti мінералів, фрейдлінгів і амебоподібного олівїну. У тонкозернистій фракції хондрита було діагностовано органічну речовину [5] та досонячні зерна мінералів [6]. Згідно з результатами досліджень, метеорит Allende було класифіковано як вуглистий хондрит CV3, тобто як гетерогенний агломерат високо- й низькотемпературних фракцій сонячної речовини з незначним вмістом досонячних зерен мінералів [1, 3]. У доземний період хондрит був частково зміненим процесами термального, ударного та водного метаморфізму [1, 3].

У матриці метеорита знайдено темні тонкозернисті включення, які за хімічним складом подібні до основної частини, але відмінні за структурою [1, 7–10], що свідчить про належність хондрита Allende до геноміктових брекчій [3]. При цьому слід відзначити, що до “темних” включень, які діагностують також як фрагменти або ксеноліти [8], було віднесено об'єкти, колір яких змінюється від світло-сірих до чорних. З нашої точки зору таке визначення є некоректним, оскільки темно-сірий колір є фоновим кольором метеорита. У даному повідомленні представлено результати досліджень сірого ксеноліта AL1.

Об'єкти та методи досліджень. Силікатний ксеноліт AL1 розміром 1,2 × 0,8 см має овальну форму і прихованокристалічну будову, був знайдений на відколі фрагментованого зразка, що зберігається в Комітеті по метеоритах НАН України. З ксеноліта відібрали незначні за розміром уламки, а з фрагмента метеорита Allende, який містить ксеноліт, виготовляли полірований шліф.

Структурно-мінералогічні характеристики вивчено під оптичним мікроскопом марки ПОЛАМ Р-312, а також за допомогою сканувальних електронних мікроскопів — марки JSM-6490LV (обладнаний енергодисперсійним спектрометром (EDS) INCA Penta FET×3) та марки JSM-6060LA фірми Jeol. Хімічний склад зерен мінералів визначено за допомогою мікроаналізатора марки JXA-8200 фірми Jeol в Техцентрі НАН України при силі струму 10 нА, прискорювальній напрузі 15 кВ, діаметрі зонда 2 мкм з використанням ZAF поправок. У зв'язку з високою пористістю олівіну і Са-піроксену в хондрах ксеноліта прецизійні дані за їх хімічним складом отримано лише для одного зерна олівіну. Валовий хімічний склад ксеноліта встановлено розфокусованим зондом (діаметр 20 мкм) як середнє з 436 вимірів.

Будова ксеноліта. Згідно з електронно-мікроскопічними дослідженнями, поверхня відколів однорідно-зерниста, пориста, розмір пор ≤ 2 мкм (рис. 1, *a*). Ксеноліт складається переважно з дрібних силікатних зерен, пористих агрегатів округлих і неправильних за формою субмікронних зерен, а також окремих крупних зерен і кристалів призматичного або таблитчастого габітусу. Важливою морфологічною ознакою пористих агрегатів є їх акреційна будова, яка сформувалась внаслідок злипання субмікронних і нанометричних зерен. Особливо це характерно для металу і пентландиту (див. *b* на рис. 1). Окремі ділянки ксеноліта аморфізовані, тобто покриті тонким шаром силікатного скла. На призматичних гранях крупних кристалів олівіну й піроксену спостерігаються деформації зсуву по спайності мінералів, а на поверхні зерен — одиничні високотемпературні бризки розплаву, нанометричні пори і включення. В одній з великих пор силікатного агрегату, стінки якої покриті плагіоклазовим склом, діагностовано систему паралельних ниткоподібних кристалів Са-збагаченого піроксену з потовщеними вершинними формами (див. *в* на рис. 1).

У полірованому шліфі ксеноліт має типову для тонкозернистої речовини хондритів будову (див. *г* на рис. 1) і (відповідно до розмірів зерен) складається з трьох головних компонентів: домінуючих пористих прихованокристалічних (≤ 1 мкм), тонкозернистих (≤ 5 мкм), а також окремих крупних зерен (≥ 5 мкм) силікатів (див. *д* на рис. 1) і металосульфідних агрегатів. Серед тонкозернистої речовини зафіксовано одиничні погано видимі силікатні хондри розміром ≤ 500 мкм та амебоподібні пористі зерна олівіну. Хондри мають округлу форму, кристалічну або мікропорфірову будову, характеризуються підвищеною пористістю, іноді наявністю тоненької оболонки із субмікронних металосульфідних зерен. Отримані результати повністю відповідають даним про компонентний склад і будову відколів ксеноліта, а також свідчать про високий вміст субмікронних твердих включень в окремих зернах мінералів.

Цікаво відзначити таке: після фрагментації, виготовлення і трирічного зберігання шліфа в лабораторних умовах на його поверхні виростили численні голчасті кристали гетиту (див. *е* на рис. 1). Особливо активний ріст відбувся в ксеноліті, що свідчить про агресивність земного середовища щодо примітивної пористої речовини нерівноважних хондритів.

Мінеральний склад ксеноліта в порівнянні з хондритом Allende досить обмежений і представлений в основному силікатами з чітким домінуванням олівіну над піроксеном, другорядними аваруїтом і пентландитом. Як акцесорні мінерали відзначали: нефелін, хроміт, ільменіт та апатит в одній із хондр. На відміну від окремих крупних кристалів олівіну і піроксену, всі зерна мінералів мають неправильну або округлу форму. Найбільший ступінь ксеноморфізму зерен спостерігається в аваруїті і пентландиті. Переважна більшість металосульфідних асоціацій представлена видовженими агрегатами субмікронних зерен і характеризується субпаралельним розташуванням у тонкозернистій речовині ксеноліта. Хімічний

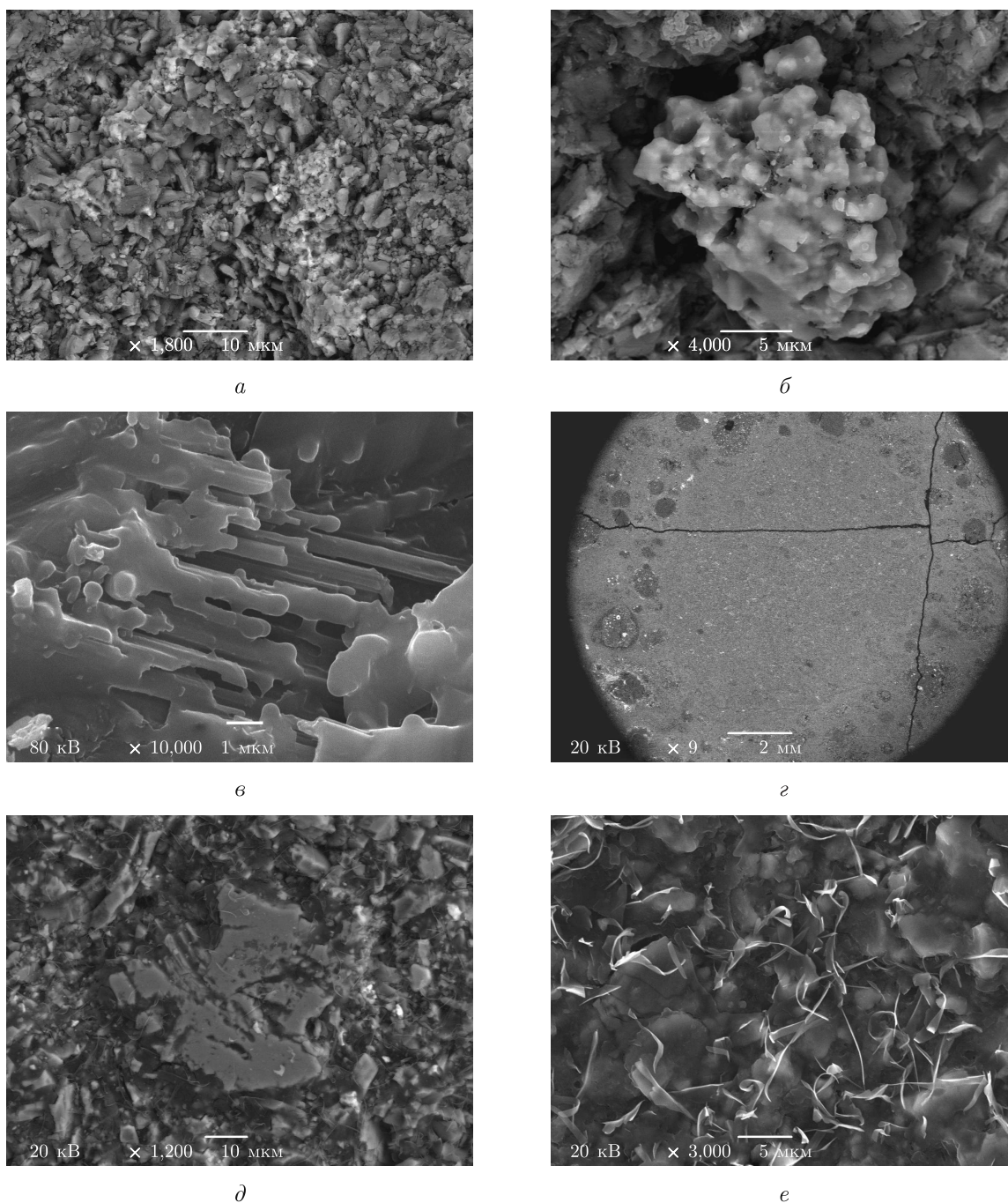


Рис. 1. СЕМ-зображення у відбитих і вторинних (e) електронах поверхні зламу (a–e) та полірованого шліфа (z–e) ксеноліта AL1 хондрита Allende:

a — тонкозерниста будова силікатного ксеноліта; б — акреційний пористий агрегат нанометричних зерен пентландиту в силікатній речовині; в — нитковидні кристали Са-піроксену в одній із пор, стінки якої покриті силікатним склом; z — чітко видима відмінність у будові ксеноліта та метеорита, що його вміщає (білі зерна — метал і сульфід; тріщини є результатом поліровки метеорита); d — крупне зерно олівіну в тонкозернистій речовині ксеноліта; e — мікронні кристали гетиту, які вирости переважно на тонкозернистій речовині ксеноліта внаслідок земного вивітрювання

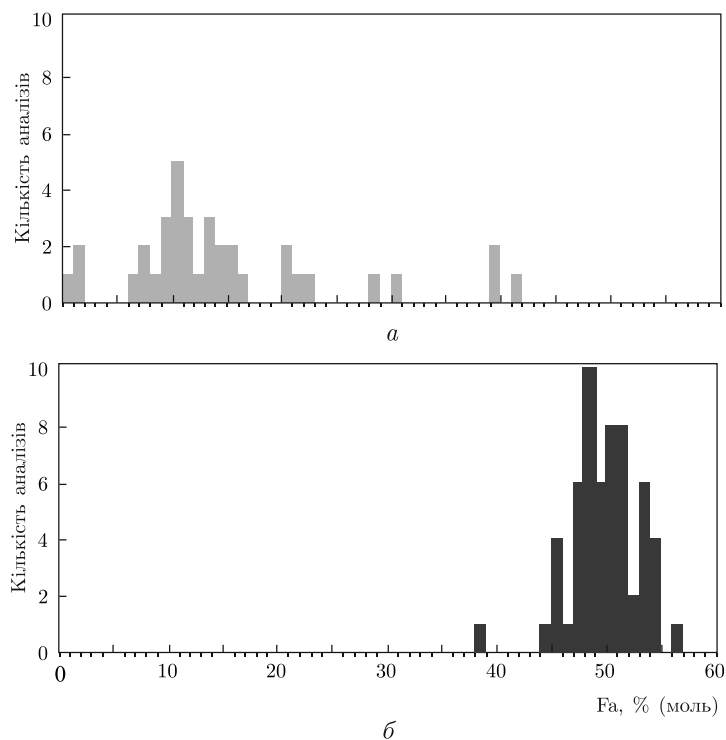


Рис. 2. Гістограма вмісту фаялітового компонента в олівині ксеноліта AL1 (а) та матриці хондрита Allende (б)

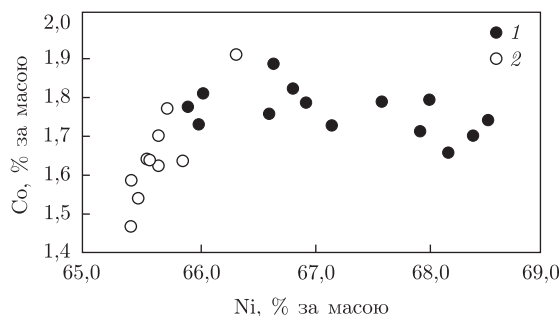


Рис. 3. Вміст Ni й Co в аваруйті ксеноліта AL1 та матриці хондрита Allende: 1 — ксеноліт; 2 — матриця

склад усіх мінералів змінюється від зерна до зерна, а також у межах зерен, що є типовим для мінералів, переповнених нанометричними включеннями.

Олівін характеризується варіацією мольного вмісту фаялітового компонента (Fa) від майже чистого форстериту до олівину з 41% Fa (рис. 2). Середній склад зерен у тонкозернистій речовині ксеноліта відповідає Fa_{15} , тобто вказує на домінування високотемпературного олівину. Склад одного із зерен олівину в хондрі відповідає $Fa_{18,9}$. Піроксен представлений лише Ca-збагаченими високотемпературними відмінами — $Fs_{1,26-6,94}En_{50,0-66,1}Wo_{38-43}$.

Хімічний склад аваруйту характеризується тенденцією до зворотної кореляції вмісту Ni й Co (рис. 3). У метали спостерігаються домішки Cr й Cu. У більшості випадків метал асоціює з пентландитом, масовий вміст Ni в якому змінюється від 17,5 до 21,9%, а Co — від 0,71 до 1,02%. На відміну від хондрита Allende, в ксеноліті не було знайдено троїліту.

Зерна нефеліну досить рідкісні, асоціюють з олівіном, середній хімічний склад по двох аналізах відповідає, % за масою: 35,1 Al₂O₃; 47,6 SiO₂; 14,2 Na₂O; 1,34 FeO; 0,76 CaO; 0,68 K₂O; 0,18 MgO; 0,05 Cr₂O₃ і 0,03 P₂O₅. Одиничні зерна ільменіту й хроміту діагностовано в силікатній речовині ксеноліта, а апатиту — в хондрі, але їх мікронні розміри не дозволили коректно визначити хімічний склад.

Валовий хімічний склад ксеноліта характеризується систематично низькою аналітичною сумою, що є типовим для тонкозернистої пористої речовини примітивних хондритів, низьким вмістом S, Ni, а також низьким співвідношенням FeO/(FeO + MgO) (табл. 1). Високий стандарт відхилення від середніх значень для Mg, Al, Ca, Fe й Si вказує на хімічну і мінералогічну неоднорідність ксеноліта на рівні 20 мкм електронного зонда. За співвідношенням SiO₂/MgO (1,37) ксеноліт відповідає вуглистим хондритам (1,42 ± 0,05) [11].

Прикмети ударного метаморфізму. Крім субпаралельного розташування металосульфідних агрегатів, що є макроскопічною ознакою проходження ударної хвилі, в ксеноліті присутні окремі структури ударного метаморфізму, які діагностуються лише на електронно-мікроскопічному рівні. Вони представлені переважно скульптурами деформації і плавлення (бризки розплаву, аморфізація стінок пор і тонкозернистих агрегатів). Наявність в одній з аморфізованих пор ниткоподібних кристалів Са-піроксену (див. в на рис. 1) однозначно свідчить про їх швидкий ріст у нерівноважних *PT*-умовах, найімовірніше внаслідок ударного метаморфізму в постагломераційний період материнського тіла хондрита Allende.

Природа ксеноліта. Для з'ясування природи ксеноліта необхідно порівняти його структурно-мінералогічні особливості з хондритом Allende в цілому, матрицею, а також з літичними включеннями. Від основної частини хондрита [1–3, 10] він відрізняється такими характеристиками: 1) сірим кольором; 2) однорідною тонкозернистою будовою; 3) низьким

Таблиця 1. Валовий хімічний склад ксеноліта AL1 та текстурних складових вуглистої хондрита Allende, % за масою

Компонент	AL1 (кількість аналізів 436)	Хондрит Allende [2]	Матриця хондрита [1]	Темні включення хондрита				
				за [1]	4294 [9]	4301 [9]	4320 [9]	4314 [9]
SiO ₂	33,73	34,20	33,09	33,22	34,43	33,83	34,01	33,25
TiO ₂	0,04	0,15	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12	0,10
Al ₂ O ₃	2,88	3,27	3,07	2,54	2,75	2,81	2,70	2,26
Cr ₂ O ₃	0,25	0,53	0,55	0,56	0,50	0,52	0,50	0,53
MgO	24,68	24,53	21,41	23,77	24,04	24,18	24,45	23,87
FeO	34,11	30,25	34,15	32,88	33,02	34,34	33,42	35,05
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 ₂ O	0,17	0,46	0,44	0,34	0,37	0,13	0,18	0,09
K ₂ O	0,01	0,04	0,03	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01
P ₂ O ₅	0,38	0,24	0,25	0,31	0,32	0,35	0,32	0,34
Елемент:								
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	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Сума аналітична	81,48	100,24	100,07	100,61	97,62	96,85	98,05	95,90
FeO/(FeO+MgO)	0,58	0,55	0,61	0,58	0,58	0,59	0,58	0,59
SiO ₂ /MgO	1,37	1,39	1,55	1,40	1,43	1,40	1,39	1,39

Примітка. Дані валового хімічного складу перераховано на 100%.

вмістом хондр і меншими їх розмірами; 4) меншою кількістю мінералів, зокрема відсутністю троїлиту й агрегатів Ca-, Al-збагачених мінералів, що зумовило помітне збіднення його тугоплавкими елементами — Ca, Ti, Al, меншим вмістом нікелевого заліза і пентландиту, а відповідно Ni й S у валовому хімічному складі (див. табл. 1); 5) більш активним земним вивітрюванням, що зумовлено його тонкозернистою будовою і підвищеною пористістю.

За структурою вивчений ксеноліт подібний до матриці хондрита Allende, але частково відрізняється за мінеральним і хімічним складом [1, 3, 12]. Збіднення ксеноліта металом і сульфідом, а також обмежена кількість високотемпературних мінералів обумовили відмінності в хімічному складі (див. табл. 1), а саме: нижчі концентрації S, Ca, Ti та злегка Al й Ni. На відміну від матриці ксеноліт характеризується більшою хімічною неоднорідністю олівіну й аваруїту, що вказує на нижчий ступінь метаморфізму. Середній хімічний склад мінералів також відмінний. Так, нижчий вміст Fe в олівіні ксеноліта (див. рис. 2) зумовлений нижчим ступенем окиснення силікатів імовірно ще в доагломераційний період, а в аваруїті (див. рис. 3) — значним виносом Fe внаслідок вивітрювання на Землі, що підтверджується також відсутністю прямої кореляції Co/Ni у металі. Відповідно співвідношення FeO/(FeO+MgO) ксеноліт є дещо менш окисненим, ніж матриця хондрита (див. табл. 1). Крім того, відмінність у відношенні SiO₂/MgO вказує на різні хімічні типи речовини, тобто про належність ксеноліта, як і метеорита в цілому, до вуглистих хондритів, а матриці — до звичайних.

За структурою, мінеральним і валовим хімічним складом ксеноліт найбільш близький до темних включень хондрита Allende [1, 7–10], але також відрізняється збідненням високотемпературними мінералами, металом і сульфідом (див. табл. 1), що є його мінералого-хімічною особливістю.

Порівняння ксеноліта AL1 з хондритом Allende та його складовими дає змогу зробити припущення про їх генетичний зв'язок. Не виключено, що тонкозерниста речовина ксеноліта є проторечовиною, тобто акреційним реліктом пилової компоненти протопланетної туманності, з якої внаслідок багатостадійних і поліхронних процесів фізико-хімічної трансформації утворилися хондри і матриця метеорита. Як окрема текстурна складова, ксеноліт виник раніше, ніж материнське тіло хондрита Allende. На відміну від останнього, він утворився в газопиловому середовищі, яке в основному було збіднене металосульфідним і високотемпературним мінеральним пилом, а також хондрами. Ця відмінність може мати як хронологічний, так і просторовий характер. Хоча речовина хондрита Allende має більш складну доземну історію, ніж речовина ксеноліта AL1, їх хімічна спорідненість підтверджує висновок попередніх досліджень про належність метеорита до геноміктових брекчій [3].

Великі розміри ксенолітів хондрита Allende, їх пористість, а також підвищена крихкість є ще одним аргументом на користь нашого припущення [13] про існування в поясі астероїдів силікатних об'єктів, фізичні характеристики яких не дозволяють проникнути через атмосферу і потрапити на Землю у вигляді окремих метеоритів. Можливо, саме з такими тілами і пов'язаний Тунгуський феномен, який характеризується потужною ударною хвилею та відсутністю вагомих речовинних залишків в 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 нанометричних силікатних зерен, які, на жаль, неможливо ні фізично, ні хімічно відокремити від їх земних аналогів. До речі, вивчення спектрів відбиття поверхні астероїдів [14] також вказує на існування в поясі астероїдів не лише материнських тіл метеоритів, а й невідомих раніше літичних об'єктів.

1. *Clarke R. S., Jarosewich E., Mason B. et al.* The Allende, Mexico, meteorite shower // *Smithsonian Contributions Earth Sci.* – 1970. – No 5. – P. 1–53.
2. *Jarosewich E., Clarke R. S., Barrows J. N.* The Allende meteorite reference sample // *Ibid.* – 1987. – No 27. – P. 1–49.
3. *Додд Р. Т.* Метеориты: Петрология и геохимия. – Москва: Мир, 1986. – 384 с.
4. *MacPherson G. J.* Calcium-Aluminum-rich inclusions in chondritic meteorites // *Treatise on Geochemistry* / Ed. H. D. Holland and K. K. Turekian. – London: Elsevier, 2004. – Vol. 1. – P. 201–246.
5. *Gilmour I.* Structural and isotopic analysis of organic matter in carbonaceous chondrites // *Treatise on Geochemistry* / Ed. H. D. Holland and K. K. Turekian. – London: Elsevier, 2004. – Vol. 1. – P. 269–290.
6. *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. Cosmochim. A.* – 1995. – **59**. – P. 115–160.
7. *Bischoff A., Palme H., Spettel B. et al.* The chemical composition of dark inclusions from the Allende meteorite (abstract) // *Lunar Planet. Sci. Conf., 19th, Houston, TX, March 14–18, 1988.* – Houston, 1988. – P. 88–89.
8. *Fruland R. M., King E. A., McKay D. S.* Allende dark inclusions // *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf., 9th, Houston, Tex., March 13–17, 1978.* – Houston, 1978. – P. 1305–1329.
9. *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. Cosmochim. A.* – 1990. – **54**. – P. 819–830.
10. *McSween H. Y.* Petrographic variations among carbonaceous chondrites of the Vigarano type // *Ibid.* – 1977. – **41**. – P. 1777–1790.
11. *Van Schmus W. R., Wood J. A.* A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites // *Geochim. Cosmochim. A.* – 1967. – **31**. – P. 745–765.
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. *Семененко В. П., Шаркин О. П., Гирич А. Л.* Высокопористые фрагменты в хондрите Саратов (L4) // *Геохимия.* – 1992. – No 6. – С. 881–892.
14. *Бельська І. М.* Оптичні властивості поверхонь астероїдів, кентаврів та тіл поясу Койпера: Автореф. дис. ... д-ра фіз.-мат. наук / Голов. астроном. обсерваторія. – Київ, 2007. – 30 с.

ДУ “Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України”, Київ

Надійшло до редакції 29.11.2011

В. П. Семененко, А. Л. Гирич, Н. В. Кичань

Тонкозернистый ксенолит AL1 в хондрите Allende (CV3): минералогия и происхождение

Приведены результаты структурно-минералогических и химических исследований тонкозернистого силикатного ксенолита AL1 в хондрите Allende (CV3). По валовому химическому составу и отношению SiO₂/MgO ксенолит относится к углистым хондритам. Пониженное содержание высокотемпературных минералов, металла и сульфида, а соответственно Ca, Al, Ti и Ni в валовом химическом составе является основной характеристикой, по которой ксенолит отличается от хондрита в целом, его матрицы и темных включений. Допускается принадлежность ксенолита к протовеществу хондр и матрицы метеорита. Наличие пористых тонкозернистых ксенолитов в хондритах является еще одним доказательством существования в поясе астероидов хрупких объектов, физические свойства которых не позволяют самостоятельно проникнуть через атмосферу и приземлиться в виде метеоритов.

V. P. Semenenko, A. L. Girich, N. V. Kychan

Fine-grained xenolith AL1 in chondrite Allende (CV3): mineralogy and origin

The results of structural, mineralogical and chemical studies of fine-grained silicate xenolith AL1 of chondrite Allende (CV3) are given. A bulk chemical composition and the ratio SiO_2/MgO allow us to refer the xenolith to carbonaceous chondrites. A low content of high-temperature minerals, metal, and sulfide, and accordingly Ca, Al, Ti and Ni in the bulk chemical composition is the main characteristic, which distinguishes the xenolith from the chondrite in total, its matrix, and dark inclusions. The belonging of the xenolith to a precursor of chondrules and to a matrix of the meteorite is supposed. The presence of porous fine-grained xenoliths in chondrites is the additional evidence of the existence in the asteroid belt of fragile objects, whose physical properties do not allow them to penetrate through the atmosphere and to land as meteorites.