

УДК 523.681

А.Л. Гіріч, В.П. Семененко

Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення
ім. М.П. Семененка НАН України
03680, м. Київ-142, Україна, пр. Акад. Палладіна, 34
E-mail: cosmin@i.ua

ПОРФІРОВИЙ БІТУМОВМІСНИЙ КСЕНОЛІТ У ХОНДРИТІ КРИМКА (LL3.1): 1. СТРУКТУРНО-МІНЕРАЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА

Наведено результати структурно-мінералогічного і хімічного дослідження нового ксеноліта хондрита Кримка (LL3.1). Ксеноліт характеризується: грубозернистою порфіровою будовою; наявністю крупних включень бітумовмісної речовини, які зосереджені головним чином на його периферії, та дрібнозернистих полімінеральних асоціацій, складених троїлітом, силікатною речовиною переважно олівінового складу, фосфатами і нікелістим залізом; наявністю дистену (?), який вперше діагностований у метеоритах і може мати метаморфічну природу; неоднорідним хімічним складом мінералів, особливо олівіну, низькокальцієвого піроксену і хроміту; складною зональністю окремих зерен низькокальцієвого піроксену, що вказує на ритмічну зміну окисно-відновних умов його кристалізації, та високим вмістом Al_2O_3 і MgO в хроміті, що свідчить про високотемпературні умови його утворення. Ксеноліт оточений тонкозернистою силікатною оболонкою з вуглецьвмісною речовиною. Головними мінералами ксеноліта є олівін ($Fe_{6,83-97,0}$), низькокальцієвий піроксен ($Fs_{2,64-22,6}En_{75,3-96,7}Wo_{0,50-6,21}$) і троїліт, другорядними — висококальцієвий піроксен ($Fs_{3,98-8,27}En_{55,0-63,6}Wo_{28,9-39,0}$) і нікелісте залізо (теніт і камасит). Акцесорні мінерали представлені хромітом, фосфатами (мерилітом і рідкісним для хондритів панетитом) і дистеном (?). У міжзерновому просторі збереглися залишки мезостазису, хімічний склад якого відповідає нормативному плагіоклазу ($Ab_{69,1-82,3}An_{16,1-30,8}Or_{0,15-2,55}$). Порфіровий бітумовмісний ксеноліт відрізняється від відомих ксенолітів хондрита Кримка і утворився, найімовірніше, внаслідок нерівноважної розкристалізації силікатного розплаву.

Ключові слова: метеорит, хондрит, ксеноліт, бітум, порфірова будова, мінерали, тонкозерниста речовина.

Метеорит Кримка (LL3.1) є унікальним за різноманіттям знайдених у ньому ксенолітів [11]. Рідкісними і одними з найбільш цікавих є ксеноліти і макрехондра, що містять вуглецьвмісну речовину, зокрема графіт. До них належать: 1) вуглисті ксеноліти K1 і K3 [5, 13], які мають однорідну дрібнозернисту будову, складені переважно олівіном, піроксеном і троїлітом, меншою мірою — нікелістим залізом, рівномірно розподіленими мікрористалами ($\leq 3 \times 0,7$ мкм) графіту, вуглецьбагаченою речовиною та органічними сполуками, і містять поодинокі дрібні ($< 0,5$ мм) хондри та їх уламки. Хімічний склад мінералів — неоднорідний. Ксеноліти оточені більш окисненою, ніж речовина ксенолітів, тонкозернистою силікатною оболон-

кою; 2) графітвмісні ксеноліти Gr1—Gr7 [1, 2, 12], які характеризуються однорідною пере-кристалізованою будовою, наявністю крупних ($< 120 \times 6$ мкм) і тонких ($< 5 \times 1$ мкм) кристалів графіту, високим вмістом троїліту і нікелістого заліза, відносно гомогенним складом силікатів та неоднорідним — хроміту, фосфатів і Fe, Ni-металу, наявністю тонкозернистих силікатних оболонок; 3) повнокристалічна силікатна макрехондра [3], яка відрізняється від інших макрехондр наявністю двох метал-троїлітових мантії і великих (≤ 100 мкм) неправильної форми зерен графіту. Хімічний склад мінералів відносно однорідний, тонкозерниста силікатна оболонка містить мікрористали графіту і вуглецьвмісну речовину.

У цій роботі представлені результати структурно-мінералогічного і хімічного досліджен-

© А.Л. ГІРІЧ, В.П. СЕМЕНЕНКО, 2016

ня нового ксеноліта, що знайдений нами в нерівноважному хондриті Кримка та відрізняється від інших ксенолітів наявністю крупних включень бітуму.

Об'єкт і методи досліджень. Уламок незвичайного силікатного порфірового ксеноліта був знайдений нами в полірованому шліфі площею $0,64 \text{ cm}^2$ індивідуального зразка метеорита Кримка. Він розташований на куті шліфа і, на жаль, є обрізаним з двох боків. Уламок має неправильну п'ятикутну форму, його розміри становлять $3,3 \times 2,2 \text{ mm}$. Уздовж однієї зі сторін знаходиться кора плавлення товщиною до 70 mkm . Макро- та мікроскопічні дослідження виконано з використанням бінокюляра МБС-10 і оптичного мікроскопа марки ПОЛАМ Р-312. Детальне вивчення структурно-мінералогічних особливостей ксеноліта в полірованому шліфі проведено за допомогою сканувального електронного мікроскопа марки *JSM-6490LV* фірми *Jeol*. Цей мікроскоп обладнаний енергодисперсійним спектрометром (*EDS*) марки *INCA Penta FETx3*, що дало змогу визначити хімічний склад окремих мінеральних зерен. Точний хімічний склад більшості зерен визначено на мікроаналізаторі марки *JXA-8200* фірми *Jeol* в Технічному центрі НАН України (аналітик В.Б. Соболев) з використанням сили

струму 10 nA та прискорювальної напруги 15 kV ; діаметр зонда 2 mkm . Як стандарти взято відомі природні мінерали. Під час обробки результатів рентгеноспектральних досліджень використовували *ZAF*-поправку. Похибка аналізу складає $1,5$ відн. % для головних елементів і $0,02$ абс. % для другорядних. Валовий хімічний склад тонкозернистої оболонки, а також тонкозернистих ділянок всередині ксеноліта встановлено розфокусованим зондом (діаметр 20 mkm) за окремими точками в межах однорідних за будовою ділянок.

Будова та мінеральний склад ксеноліта. Ксеноліт (рис. 1, *a*) має порфірову будову і складений переважно грубими ($20\text{--}300 \text{ mkm}$) зернами олівіну та низькокальцієвого піроксену, що розташовані у частково розкристалізованому мезостазисі. Він містить як окремі дрібні ($\leq 20 \text{ mkm}$) зерна, так і великі (до 850 mkm) неправильної форми асоціації рудних мінералів. З необрізаних сторін ксеноліт оточений нерівномірною за шириною ($\leq 200 \text{ mkm}$) тонкозернистою силікатною оболонкою, а також містить кілька неправильної форми ділянок ($\leq 400 \text{ mkm}$) тонкозернистої речовини по периферії (рис. 1, *b*).

Важливою особливістю ксеноліта є наявність включень бітуму (рис. 2, *a*) у вигляді різ-

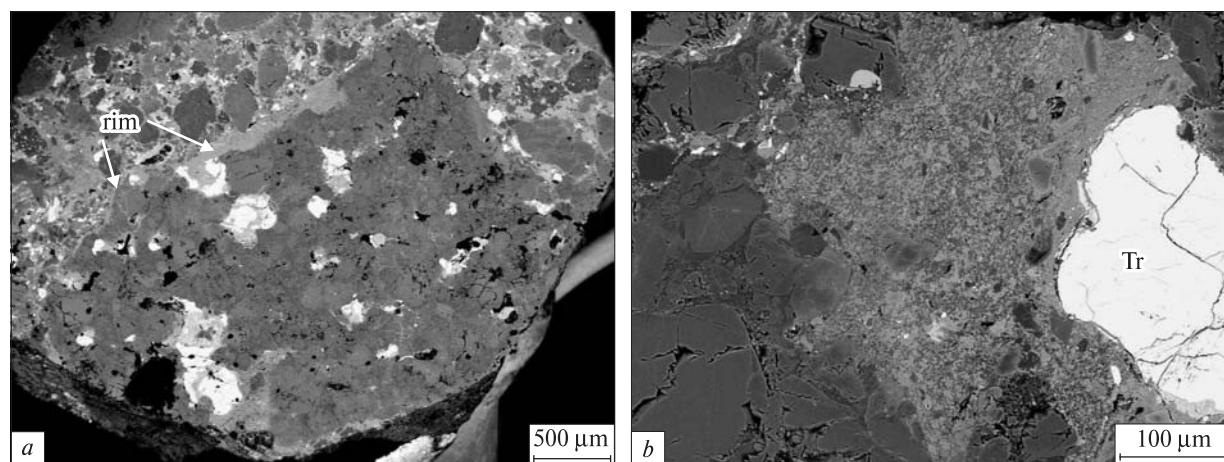


Рис. 1. Сканувальні електронно-мікроскопічні (СЕМ) зображення у відбитих електронах бітумовмісного ксеноліта у хондриті Кримка. Світло-сіре і сіре — силікати, біле — троїліт і нікелісте залізо, чорне — включення бітуму та дефекти поліровки: *a* — загальний вигляд ксеноліта, вкритого тонкозернистою оболонкою (rim) і розташованого на краю полірованого шліфа; *b* — ділянка тонкозернистої силікатної речовини (світло-сіра, в центрі) на периферії ксеноліта, праворуч розташоване крупне тріщинувате зерно троїліту (Tr)

Fig. 1. Back-scattered electron microscopic (BSE) images of the bitumen-bearing xenolith in the Krymka chondrite. Light gray and gray — silicates, white — troilite and nickel iron, black — bitumen inclusions and polishing defects: *a* — common image of the xenolith, coated by a fine-grained rim and located on a margin of the polished section; *b* — area of a fine-grained material (light gray, in the center) located on the periphery of the xenolith, a coarse cracked troilite (Tr) grain is arranged on the right

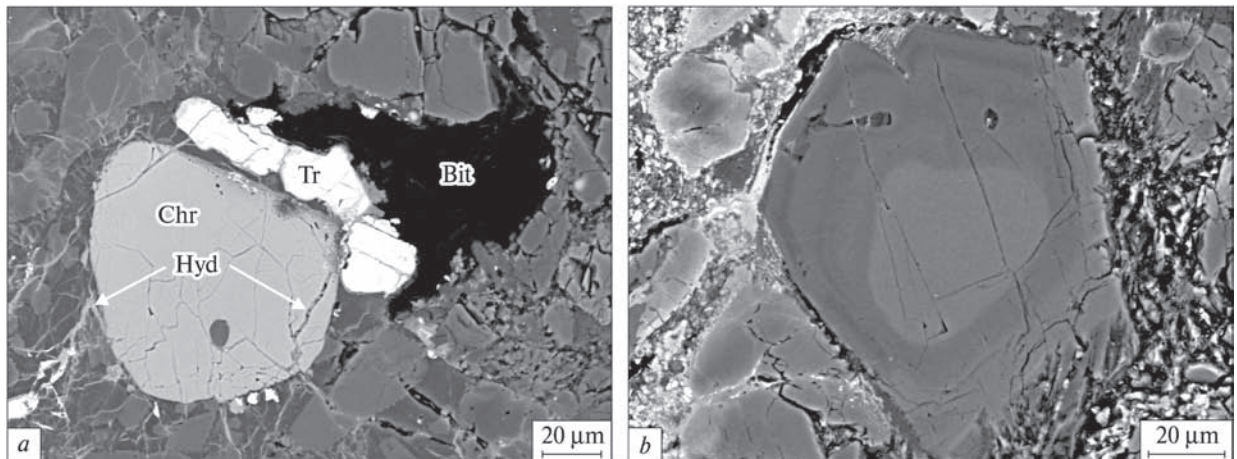


Рис. 2. СЕМ зображення у відбитих електронах грубих зерен у бітумовмісному ксеноліті хондрита Кримка: *a* — включення бітуму (Bit) в асоціації з троїлітом (Tr) і хромітом (Chr). Тріщини в хроміті, троїліті та силікатах (сіре, темно-сіре) частково заповнені гідроксидами заліза (Hyd); *b* — ідіоморфне тріщинувате зерно низькокальцієвого піроксену, яке характеризується чергуванням зворотної і прямої концентричної зональності

Fig. 2. BSE images of the coarse grains within the Krymka bitumen-bearing xenolith: *a* — the bitumen inclusion (Bit) associated with troilite (Tr) and chromite (Chr). The chromite, troilite and silicates (gray, dark gray) contain iron hydroxide veins (Hyd); *b* — the cracked euhedral Ca-low pyroxene grain which is characterized by alternate of reverse and straight concentric zoning

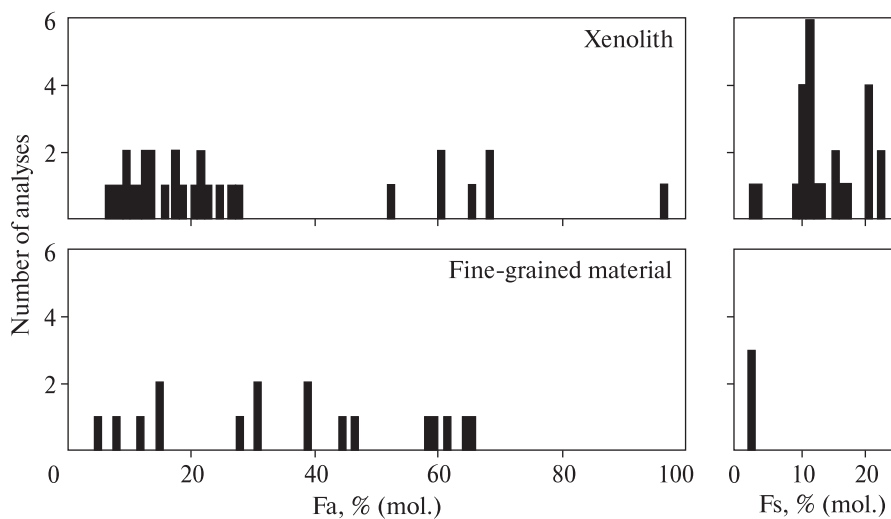


Рис. 3. Вміст фаялітової (Fa) компоненти в олівіні та ферросилітової (Fs) компоненти в низькокальцієвому піроксені бітумовмісному ксеноліті (Xenolith) та його тонкозернистої речовини (Fine-grained material) у хондриті Кримка

Fig. 3. Fa-contents of olivine and Fs-contents of Ca-low pyroxene within the bitumen-bearing xenolith and its fine-grained material in the Krymka chondrite

них за розміром (до 150 мкм) неправильної форми ділянок, що зосереджені на периферії ксеноліта. Будова, хімічний склад і походження бітуму будуть детально розглянуті у другій нашій статті, присвяченій бітумовмісному ксеноліту [4].

Головними мінералами ксеноліта є олівін, низькокальцієвий піроксен і троїліт, другорядними — висококальцієвий піроксен та нікелісте залізо (теніт і камасит). Акцесорні мінерали представлені хромітом, фосфатами (мерилітом і панетитом) і дистеном (?). В міжзерновому просторі збереглися залишки мезостазису, хімічний склад якого відповідає

нормативному плагіоклазу. Більшість мінеральних зерен тріщинуваті (рис. 2, *a, b*), місцями по тріщинах розвинуті гідроксиди заліза (рис. 2, *a*).

Олівін представлений ідіо-, гіпідіоморфними, округлими, рідше — ксеноморфними зернами, які характеризуються наявністю тонкої збагаченої залізом оболонки. Окремі зерна мають плямисту будову. Хімічний склад олівіну (Fa_{6,83–97,0}) змінюється в широких межах від зерна до зерна і в межах зерен (рис. 3, табл. 1) та містить домішки Cr₂O₃ і CaO. Причому найвищі значення вмісту фаялітової компоненти спостерігаються, як правило, в плямистих зер-

нах, що межують з великими рудними асоціаціями. Це свідчить про вторинний характер плямистої будови олівіну, яка утворилась в результаті нерівномірного окиснення зерен, зумовленого безпосереднім контактом з троїлітом і Fe,Ni-металом.

Зерна низькокальцієвого піроксену (на відміну від олівіну) характеризуються вищим ступенем ідіоморфізму, а також чергуванням зворотної і прямої концентричної зональності хімічного складу (рис. 2, *b*). Піроксенові зерна зі зворотною зональністю були відмічені у хондрах енстатитових хондритів, що вказує на їх кристалізацію у відновних умовах [9]. Наявність у ксеноліті зерен зі складною зональністю свідчить про ритмічну зміну окисно-відновних умов кристалізації піроксену. Хімічний склад низькокальцієвого піроксену змінюється від зерна до зерна, а також у межах зерен (рис. 3, табл. 1) і відповідає $Fs_{2,64-22,6}En_{75,3-96,7}Wo_{0,50-6,21}$. Зерна енстатиту мають неправильну форму і розташовані на контакті з рудними асоціаціями в зростанні із залістим олівіном.

Висококальцієвий піроксен переважно у вигляді дрібних (≤ 20 мкм) ідіоморфних зерен розташований у частково розкриталізованому мезостазисі, а також в окремих кристалах низькокальцієвого піроксену. Його хімічний склад ($Fs_{3,98-8,27}En_{55,0-63,6}Wo_{28,9-39,0}$) також змінюється від зерна до зерна і в межах зерен (табл. 1). Підвищений вміст Cr_2O_3 характерний як для високо-, так і для низькокальцієвого піроксенів.

Мезостазис відмічений у невеликій кількості у міжзерновому просторі. Ступінь його розкриталізації коливається від ділянки до ділянки, а хімічний склад ($Ab_{69,1-82,3}An_{16,1-30,8} \times Or_{0,15-2,55}$) відповідає нормативному плагіоклазу з переважною часткою альбітової компоненти (табл. 1).

Троїліт є головним рудним мінералом ксеноліта і представлений кількома великими (до 850 мкм) тріщинуватими зернами неправильної форми, які вміщують складні полімінеральні асоціації, окремими дрібними зернами, а на окремих ділянках — прожилками в силікатах та у міжзерновому просторі. Як основний

Таблиця 1. Хімічний склад (мас. %) силікатів у бітумовісному ксеноліті хондрита Кримка (LL3.1), визначений за допомогою мікрозонда

Table 1. Chemical composition (wt. %) obtained by electron microprobe of silicates within the bitumen-bearing xenolith of the Krymka (LL3.1) chondrite

Компонент	Олівін		Піроксен		Са-піроксен		Мезостазис	
	межі (29)	середнє	межі (25)	середнє	межі (12)	середнє	межі (9)	середнє
SiO ₂	31,3—40,8	37,7	53,5—59,0	55,1	51,6—54,4	53,2	59,0—64,9	63,1
TiO ₂	Н. в.—0,06	<0,02	<0,01—0,25	0,13	0,28—0,67	0,41	0,03—0,51	0,33
Al ₂ O ₃	Н. в.—0,17	<0,02	0,05—2,26	0,85	1,07—2,46	1,75	17,8—24,1	20,0
Cr ₂ O ₃	<0,01—0,31	0,10	<0,01—1,93	0,85	0,83—1,79	1,31	Н. в.—0,03	<0,01
MgO	1,15—52,1	37,8	27,4—39,0	30,7	19,0—23,0	20,8	<0,01—2,06	1,04
FeO	6,81—65,1	23,8	1,85—15,1	9,01	2,49—5,09	4,16	0,97—3,88	2,42
MnO	0,28—0,86	0,47	0,08—0,55	0,43	0,30—0,46	0,40	<0,01—0,07	0,04
CaO	0,04—0,31	0,18	0,28—3,21	1,98	14,5—19,0	16,8	3,26—6,20	4,15
Na ₂ O	<0,01—0,23	0,06	<0,02—0,27	0,11	0,27—0,49	0,38	7,18—9,18	8,12
K ₂ O	Н. в.—0,04	<0,01	Н. в.—0,03	<0,01	Н. в.—0,03	<0,01	0,03—0,40	0,25
P ₂ O ₅	Н. в.—0,21	0,04	Н. в.—0,06	<0,01	<0,01—0,05	0,03	Н. в.—0,11	0,06
Сума		100,2		99,2		99,2		99,5
<i>Fa</i>	6,83—97,0	28,4						
<i>Fo</i>	3,05—93,2	71,6						
<i>Fs</i>			2,64—22,6	13,7	3,98—8,27	6,63		
<i>En</i>			75,3—96,7	82,4	55,0—63,6	59,0		
<i>Wo</i>			0,50—6,21	3,86	28,9—39,0	34,3		
<i>Ab</i>							69,1—82,3	76,8
<i>An</i>							16,1—30,8	21,7
<i>Or</i>							0,15—2,55	1,60

Примітка. Тут і у табл. 2. У дужках вказано кількість аналізів; Н. в. — не визначено.

Note. Here and in Table 2. The number of analysis is in brackets; Н. в. — is not determined.

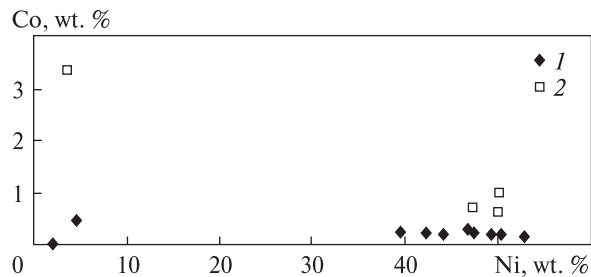


Рис. 4. Вміст Ni і Co в нікелістому залізі бітумовмісного ксеноліта (1) та його тонкозернистої речовини (2) у хондриті Кримка

Fig. 4. Ni vs. Co plot of the Fe,Ni-metal within the bitumen-bearing xenolith (1) and its fine-grained material (2) in the Krymka chondrite

компонент він входить до складу крупних полімінеральних асоціацій. Хімічний склад троїліту (табл. 2) коливається від зерна до зерна і в межах зерен.

Нікелісте залізо представлене камаситом і тенітом. Камасит у вигляді окремих тонких і дрібних (<1–20 мкм) зерен неправильної форми розташований у мезостазисі або по краях силікатних зерен. Його хімічний склад (рис. 4, табл. 2) вирізняється низьким вмістом Co, а підвищений вміст Cr в окремих зернах може бути пов'язаний із його захопленням із сусіднього зерна хроміту під час аналізу. Дрібні зерна теніту як правило знаходяться в асоціації з троїлітом, або у вигляді включень у бітумі і троїліті. Хімічний склад теніту (табл. 2) коливається від зерна до зерна і характеризується низьким вмістом Co, який не корелює з Ni (рис. 4).

Хроміт діагностовано у вигляді окремих дрібних тріщинуватих зерен неправильної форми або округлих включень у зернах силікатів, переважно олівіну. Відмічено велике (100

Таблиця 2. Хімічний склад (мас. %) нікелістого заліза і троїліту в бітумовмісному ксеноліті та його тонкозернистій речовині у хондриті Кримка (LL3.1), визначений за допомогою мікрозонда

Table 2. Chemical composition (wt. %) obtained by electron microprobe of nickel iron and troilite within the bitumen-bearing xenolith and its fine-grained material in the Krymka (LL3.1) chondrite

Елемент	Ксеноліт					
	Троїліт		Камасит		Теніт	
	межі (23)	середнє	межі (3)	середнє	межі (8)	середнє
Fe	60,1–63,5	62,8	92,7–96,6	95,0	45,8–60,4	52,4
Ni	Н. в.—1,48	0,12	2,00–4,53	2,87	39,4–52,8	46,5
Co	Н. в.—0,16	<0,01	Н. в.—0,47	0,16	0,16–0,28	0,22
Cu	Н. в.—0,08	<0,02	Н. в.—0,03	<0,01	0,12–0,24	0,19
Cr	Н. в.—0,52	0,08	0,13–1,30	0,88	0,06–0,86	0,24
S	36,1–38,1	37,5	Н. в.—<0,01	<0,01	Н. в.—0,08	0,03
P	Н. в.—<0,02	0,00	Н. в.—<0,01	<0,01	Н. в.—<0,01	<0,01
Si	Н. в.—0,06	<0,01	0,07–0,11	0,08	Н. в.—0,07	<0,02
Ca	Н. в.—0,03	<0,01	<0,02–0,19	0,12	Н. в.—0,03	<0,01
Сума		100,5		99,1		99,6
Елемент	Тонкозерниста речовина					
	Троїліт		Камасит		Теніт	
	межі (3)	середнє	(1)		межі (3)	середнє
Fe	61,7–63,4	62,6	92,2		48,3–60,4	52,4
Ni	<0,01–0,85	0,33	3,67		39,4–49,6	48,9
Co	Н. в.—0,05	0,03	3,36		0,63–0,98	0,77
Cu	Н. в.—0,07	0,04	<0,01		0,16–0,22	0,18
Cr	0,03–0,11	0,06	0,08		0,03–0,20	0,10
S	37,1–37,6	37,4	<0,01		Н. в.—<0,01	<0,01
P	Н. в.	Н. в.	Н. в.		<0,01–<0,02	<0,01
Si	<0,02–0,15	0,07	0,04		0,03–0,04	0,03
Ca	Н. в.—<0,02	<0,01	Н. в.		Н. в.	Н. в.
Сума		100,6	99,4			99,1

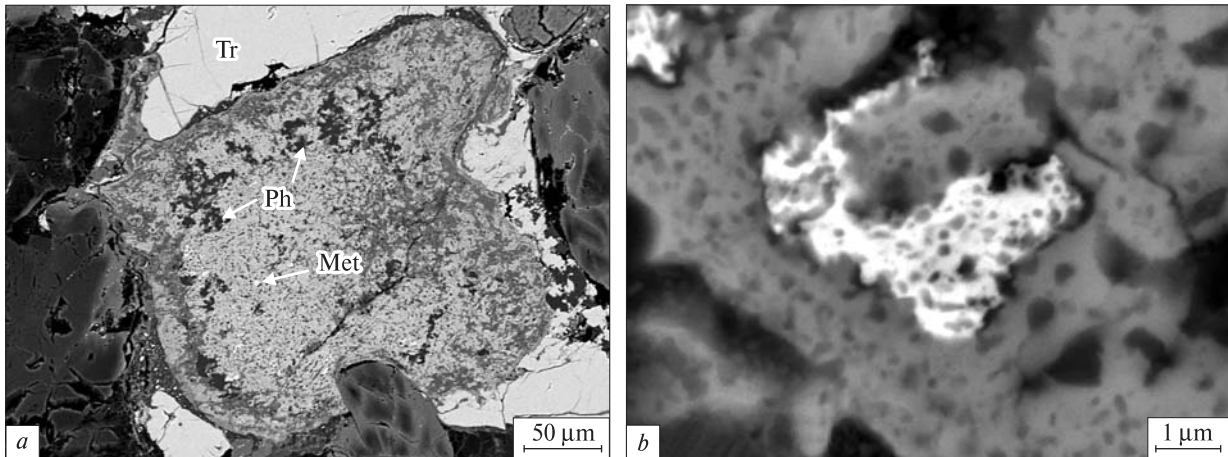


Рис. 5. СЕМ зображення у відбитих електронах складної полімінеральної асоціації, яка розташована на периферії крупного зерна троїліту (Tr) в бітумовмісному ксеноліті хондрита Кримка: *a* — асоціація складена тонкозернистою сумішшю амебоподібних зерен троїліту (світло-сіре), силікатної речовини (сіре), фосфатів (Ph) і теніту (Met); *b* — теніт (біле) і троїліт (світло-сіре) містять численні нановключення (сіре, темно-сіре) ймовірно кремнезему, силікатів і фосфатів

Fig. 5. BSE images of the complicated polymineral association located on the periphery of a coarse troilite grain (Tr) within the Krymka bitumen-bearing xenolith: *a* — the association is composed by a fine-grained mixture of amoeboid grains of troilite (light gray), silicate material (gray), phosphates (Ph) and taenite (Met); *b* — taenite (white) and troilite (light gray) contain numerous nanoinclusions (gray, dark gray) probably of silica, silicates and phosphates

мкм) зерно хроміту (рис. 2, *a*) в асоціації з троїлітом і нікелістим залізом, яке містить округле включення низькокальцієвого піроксену і розбите тріщинами, частково заповненими

гідроксидами заліза. Хімічний склад хроміту (табл. 3) значно коливається від зерна до зерна і в цілому характеризується високим вмістом Al_2O_3 і MgO , що вказує на високотемпературні

Таблиця 3. Хімічний склад (мас. %) фосфатів і хромітів у бітумовмісному ксеноліті хондрита Кримка (LL3.1), визначений за допомогою мікрозонда

Table 3. Chemical composition (wt. %) obtained by electron microprobe of phosphates and chromites within the bitumen-bearing xenolith of the Krymka (LL3.1) chondrite

Компонент	Мериліт		Панетит		Хроміт	
	межі (13)	середнє	межі (5)	середнє	межі (16)	середнє
SiO ₂	<0,02—0,90	0,14	<0,01—0,47	0,11	0,03—1,09	0,14
TiO ₂	Н. в.—0,03	<0,01	Н. в.—0,03	<0,01	1,25—3,54	1,83
Al ₂ O ₃	Н. в.—<0,02	<0,01	Н. в.—0,05	<0,01	9,77—21,0	15,3
Cr ₂ O ₃	Н. в.—0,11	0,03	Н. в.—<0,02	0,00	43,1—53,4	49,6
V ₂ O ₃	Н. в.—0,04	<0,01	Н. в.	Н. в.	Н. в.—0,51	0,39
MgO	2,78—3,43	3,23	9,29—10,2	9,80	2,19—12,2	7,72
FeO	2,22—6,42	3,08	26,9—28,5	27,4	17,0—31,7	23,4
MnO	Н. в.—0,08	0,04	0,69—0,81	0,76	0,16—0,67	0,35
CaO	42,1—47,5	45,4	0,05—0,31	0,12	Н. в.—0,47	0,09
ZnO	Н. а.	Н. а.	Н. а.	Н. а.	0,33—2,96	0,98
Na ₂ O	2,49—2,87	2,67	15,4—19,4	17,8	Н. в.—0,06	<0,01
K ₂ O	Н. в.—0,03	<0,01	Н. в.—0,03	<0,01	Н. в.—0,03	<0,01
P ₂ O ₅	43,3—47,2	45,2	42,9—45,4	44,4	Н. в.—<0,02	0,00
F	0,39—0,56	0,47	0,20—0,31	0,27	Н. а.	Н. а.
Cl	Н. в.—<0,02	<0,01	Н. в.—<0,02	<0,01	" "	" "
Сума		100,2		100,7		99,8

Примітка. Тут і у табл. 4. У дужках вказано кількість аналізів; Н. в. — не визначено; Н. а. — не аналізували.
Note. Here and in Table 4. The number of analysis is in brackets; Н. в. — is not determined; Н. а. — is not analyzed.

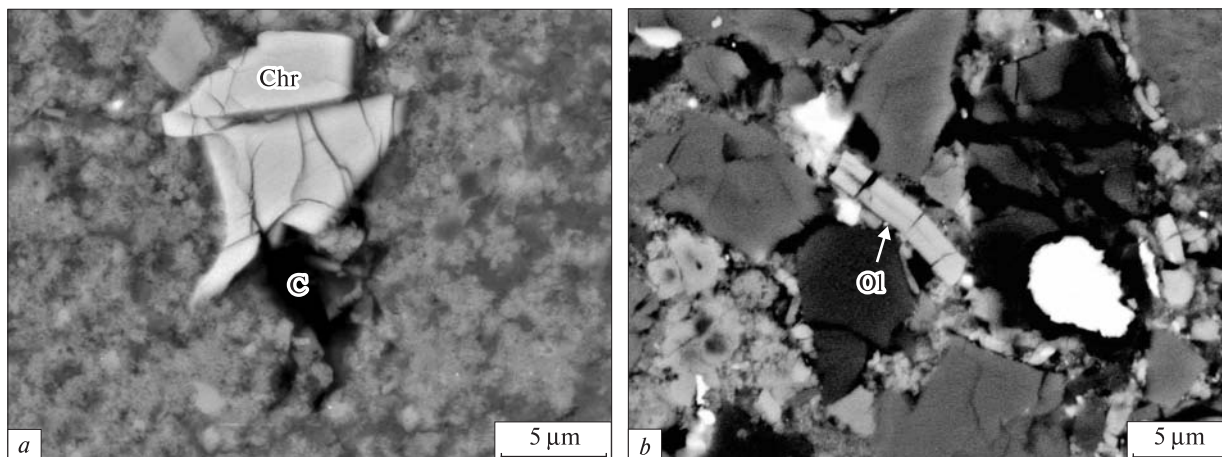


Рис. 6. СЕМ зображення у відбитих електронах тонкозернистої силікатної оболонки бітумовмісного ксеноліта хондрита Кримка: *a* — брекційоване зерно хроміту (Chr) і ділянка вуглецьвмісної речовини (C), розташована в силікатах (сіре, темно-сіре); *b* — брекційований фрагмент ниткоподібного кристала залізного олівіну (Ol). Від світло- до темно-сірого — силікати, біле — троїліт і нікелісте залізо, чорне — пори та дефекти поліровки

Fig. 6. BSE images of a fine-grained silicate rim of the Krymka bitumen-bearing xenolith: *a* — the brecciated chromite grain (Chr) and the area of carbon-bearing material (C) arranged within silicates (gray, dark gray); *b* — brecciated clast of the fibrous Fa-rich olivine crystal (Ol). Light gray, gray and dark gray — silicates, white — troilite and nickel iron, black — holes and polishing defects

умови його утворення. Хроміт у вигляді включень у силікатах містить вищі концентрації цих компонентів і нижчі — TiO_2 .

Полімінеральні асоціації розміром до 300 мкм (рис. 5, *a*) складені тонкозернистою сумішшю амебоподібних зерен троїліту, силікатної речовини переважно олівінового складу, фосфатів (мериліту і рідкісного для хондритів [7] панетиту) і нікелістого заліза (теніту). У свою чергу, зерна троїліту і металу переповнені нановключеннями, ймовірно, кремнезему, силікатів і фосфатів (рис. 5, *b*). Фосфати, які знайдено лише у складі полімінеральних асоціацій у вигляді дрібних амебоподібних зерен, характеризуються неоднорідним хімічним складом (табл. 3). Значна частина троїліту і силікатної речовини заміщена гідроксидами заліза.

На периферії однієї з полімінеральних асоціацій уперше у метеоритах діагностовано три зерна дистену (?) — $\text{Al}_2\text{O}[\text{SiO}_4]$. Вони мають округлу або видовжену форму і розмір від 2×2 до 3×11 мкм. На жаль, через незначний розмір зерен не вдалося точно визначити їх хімічний склад, який характеризується високою концентрацією Al_2O_3 і наявністю SiO_2 . За даними мікрозондових досліджень, одне із зерен вміщує, мас. %: 63,8 Al_2O_3 ; 28,9 SiO_2 ; 3,10 FeO ; 0,71 MgO ; 0,29 Na_2O ; 0,20 S; 0,10 Ni; 0,08 K_2O ; 0,05 V_2O_5 ; 0,04 CaO; 0,03 MnO; 0,03 Cr_2O_3 ; <0,02 P_2O_5 ; *сума* — 97,3. Враховуючи занижений (на

8 мас. %) вміст SiO_2 в аналізах у порівнянні з теоретично розрахованим складом дистену, а також неточність визначення, зумовлену малим розміром зерен, ми залишаємо остаточну діагностику цього мінералу під питанням.

Тонкозернисті оболонка і ділянки всередині ксеноліта складені прихованокристалічно (<0,1 мкм) силікатною речовиною, тонкими (<5 мкм) і крупними (>5 мкм) силікатними зернами, а також містять невеликі амебоподібні та видовжені ділянки вуглецьвмісної (ймовірно, бітумовмісної) речовини (рис 6, *a*). В оболонці діагностовані мікрохондри. Тонкозерниста речовина нерівномірно окиснена і збіднена на нікелісте залізо і троїліт, які представлені окремими дрібними зернами неправильної форми. Силікатні зерна мають уламкову або округлу форму. Відмічено окремі ксеноморфні зерна, а також фрагменти ниткоподібних кристалів залізного олівіну (рис. 6, *b*). Останній, як рідкісний різновид, знайдено у тонкозернистій речовині ксеноліта BK13 [10] і як акцесорний — у тонкозернистих силікатних оболонках хондр метеорита Кримка.

Олівін ($\text{Fa}_{4,86-65,6}$) — головний мінерал тонкозернистої речовини, є в середньому більш залістим, ніж у ксеноліті (рис. 3, табл. 4). Більшість крупних зерен — зональні, із світлою збагаченою FeO периферією. Три зерна низькокальцієвого піроксену, для яких вдалося

отримати прецизійні аналізи, представлені ен-статитом ($Fs_{2,16-2,91}En_{96,8-97,4}Wo_{0,03-0,49}$). Висококальцієвий піроксен ($Fs_{5,67-10,3}En_{45,5-54,6} \times Wo_{39,7-44,2}$) містить більше воластонітової компоненти, ніж у ксеноліті (табл. 4). Нікелісте залізо представлене камаситом і тенітом, які характеризуються вищим вмістом Со, ніж у ксеноліті (рис. 4, табл. 2). Троїліт за хімічним складом не відрізняється від зерен у ксеноліті. Уламкове брекчіюване зерно хроміту (рис. 6, а) в оболонці відрізняється від хроміту в ксеноліті низьким вмістом MgO (табл. 4).

Тонкозерниста речовина ділянок у ксеноліті та оболонки подібна не тільки за будовою і мінеральним складом, а і за валовим хімічним складом. Тому ми наводимо її узагальнений валовий хімічний склад, визначений як середнє по 117 точках вимірювання, за даними мікрозондових досліджень, мас. %: 40,6 FeO; 32,2 SiO₂; 11,9 MgO; 3,38 Al₂O₃; 1,28 Na₂O; 0,98 Ni; 0,72 CaO; 0,36 MnO; 0,27 Cr₂O₃; 0,24 K₂O; 0,14 P₂O₅; 0,19 S; сума — 92,2. Він характеризується низькою аналітичною сумою, що зумовлено пористою будовою, наявністю вуглецьвмісної речовини і гідроксидів заліза. За співвідношеннями SiO₂/MgO (2,7) і FeO/(FeO + MgO) (0,77) тонкозер-

ниста речовина ксеноліта найбільше подібна до тонкозернистих оболонок вуглистих ксенолітів K1 і K3 хондрита Кримка [6] і займає проміжне положення між прозорою та непрозорою матрицями цього ж метеорита [8]. Подібність тонкозернистої речовини ділянок і оболонки, а також розташування ділянок виключно на периферії ксеноліта дають підстави для припущення щодо їх належності до оболонки.

Ксеноліт містить структури крихких деформацій (тріщинуватість), ударного нагріву (силікатні вclusions в нікелістому залізі і троїліті та амебоподібна форма зерен нікелістого заліза в полімінеральних асоціаціях, часткова розкристалізація плагіоклазового мезостази-су) та плавлення (прожилки троїліту та бітумовмісної речовини), що вказує на їх ударно-метаморфічну природу. Ці структури ударного метаморфізму поширені нерівномірно. Зокрема, в тонкозернистій речовині спостерігаються лише окремі тріщинуваті зерна мінералів і прожилки вуглецьвмісної речовини. Наявність прожилків троїліту є ознакою ударного нагріву окремих локальних ділянок ксеноліта до температури його плавлення, тобто до 988 °С.

Таблиця 4. Хімічний склад (мас. %) силікатів і хроміту в тонкозернистій речовині бітумовмісного ксеноліта у хондриті Кримка (LL3.1), визначений за допомогою мікрозонда
Table 4. Chemical composition (wt. %) obtained by electron microprobe of silicates and chromite within fine-grained material of the bitumen-bearing xenolith in the Krymka (LL3.1) chondrite

Компонент	Олівін		Піроксен		Са-піроксен		Хроміт
	межі (17)	середнє	межі (3)	середнє	межі (3)	середнє	
SiO ₂	32,0—41,0	35,9	56,8—58,2	57,6	52,0—52,1	52,0	0,29
TiO ₂	Н. в.—0,42	0,05	Н. в.—<0,02	<0,01	0,37—0,88	0,65	1,23
Al ₂ O ₃	<0,01—0,36	0,10	<0,01—1,34	0,52	1,09—2,33	1,89	12,0
Cr ₂ O ₃	<0,02—0,84	0,22	Н. в.—0,36	0,14	1,10—1,31	1,22	48,7
V ₂ O ₃	Н. а.	Н. а.	Н. а.	Н. а.	Н. а.	Н. а.	0,50
MgO	15,3—53,7	32,4	39,1—40,0	39,4	15,0—19,4	17,4	0,67
FeO	4,90—52,0	30,9	1,54—2,10	1,87	3,59—6,50	5,39	34,8
MnO	0,27—0,59	0,39	<0,01—0,10	0,07	0,24—0,30	0,26	0,18
CaO	0,06—0,33	0,16	<0,02—0,28	0,15	19,6—20,3	19,9	0,04
ZnO	Н. а.	Н. а.	Н. а.	Н. а.	Н. а.	Н. а.	0,48
Na ₂ O	Н. в.—0,18	0,06	<0,02—0,05	0,03	0,39—1,42	0,77	<0,01
K ₂ O	Н. в.—0,04	<0,01	Н. в.—<0,01	0,00	Н. в.—<0,01	0,00	<0,02
P ₂ O ₅	<0,01—0,08	0,04	Н. в.—<0,01	<0,01	<0,02	<0,02	0,00
Сума		100,2		99,8		99,5	98,9
Fa	4,86—65,6	36,5					
Fo	34,4—95,1	63,5					
Fs			2,16—2,91	2,59	5,67—10,3	8,76	
En			96,8—97,4	97,2	45,5—54,6	50,0	
Wo			0,03—0,49	0,26	39,7—44,2	41,3	

Висновки. Згідно з проведеними нами дослідженнями, бітумовмісний ксеноліт хондрита Кримка характеризується такими структурно-мінералогічними та хімічними особливостями: 1) неоднорідною порфіровою будовою; 2) наявністю бітумовмісної речовини, зосередженої переважно на периферії ксеноліта; 3) наявністю нетипових дрібнозернистих полімінеральних асоціацій, складених троїлітом, силікатною речовиною переважно олівінового складу, фосфатами (мерилітом і рідкісним для хондритів панетитом) і нікелістим залізом, які потребують додаткових досліджень; 4) наявністю акцесорних зерен дистену (?), який вперше діагностований у метеоритах і може мати метаморфічну природу; 5) неоднорідним хімічним складом мінералів, особливо олівіну, низькокальцієвого піроксену і хроміту; 6) складною зональністю окремих зерен низькокальцієвого

піроксену, що вказує на ритмічну зміну окисно-відновних умов його кристалізації; 7) високим вмістом Al_2O_3 і MgO в хроміті, що свідчить про високотемпературні умови його утворення; 8) наявністю тонкозернистої силікатної оболонки з вуглецьвмісною речовиною.

Отже, порфіровий бітумовмісний ксеноліт відрізняється від відомих ксенолітів хондрита Кримка і утворився, найімовірніше, внаслідок нерівноважної розкристалізації силікатного розплаву з подальшим надходженням бітумовмісної речовини. Більш детально питання походження ксеноліта розглянуто в нашій другій статті, надрукованій у наступному числі "Мінералогічний журнал".

Автори глибоко вдячні В.Б. Соболеву і В.М. Сливінському за технічну допомогу під час проведення мікрозондових та електронно-мікроскопічних досліджень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Семененко В.П., Гірич А.Л. Хондрит Кримка (LL3): I. Мінералогія графітсодержащих ксенолитов // Мінерал. журн. — 2001. — 23, № 2/3. — С. 15—26.
2. Семененко В.П., Гірич А.Л. Хондрит Кримка (LL3): II. Природа графітсодержащих ксенолитов // Мінерал. журн. — 2001. — 23, № 2/3. — С. 27—36.
3. Семененко В.П., Гірич А.Л. Мінералогічні особливості та генезис унікальної макрохондри метеорита Кримка (LL3.1) // Доп. НАН України. — 2011. — № 11. — С. 107—114.
4. Семененко В.П., Гірич А.Л. Порфіровий бітумовмісний ксеноліт у хондриті Кримка (LL3.1): 2. Будова, хімічний склад та походження бітуму // Мінерал. журн. — 2016. — 38, № 4. — (у друці).
5. Семененко В.П., Колесов Г.М., Самойлович Л.Г., Головка Н. В., Люль А.Ю. Угlistые включения в хондрите Крымка (LL3) // Геохимия. — 1991. — № 8. — С. 1111—1121.
6. Семененко В.П., Шкуренко К.О., Гірич А.Л. Хімічна неоднорідність тонкозернистої речовини в метеориті Кримка (LL3.1) // Мінерал. журн. — 2014. — 36, № 4. — С. 39—49.
7. Юдин И.А., Коломенский В.Д. Мінералогія метеоритов. — Свердловск : Урал. науч. центр АН СССР, 1987. — 200 с.
8. Huss G.R., Keil K., Taylor G.J. The matrices of unequilibrated ordinary chondrites: Implications for the origin and history of chondrites // Geochim. et cosmochim. acta. — 1981. — 45. — P. 33—51.
9. Nagahara H. Multi-stage reduction in the primitive enstatite chondrites // Lunar Planet. Sci. — 1985. — 16. — P. 607—608.
10. Semenenko V.P., Bischoff A., Weber I., Perron C., Girich A.L. Mineralogy of fine-grained material in the Krymka (LL3.1) chondrite // Meteoritics and Planet. Sci. — 2001. — 36. — P. 1067—1085.
11. Semenenko V.P., Girich A.L. A variety of lithic fragments in the Krymka (LL3.1) chondrite // Meteoritics and Planet. Sci. — 2001. — 36. — P. A187.
12. 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. et cosmochim. acta. — 2004. — 68. — P. 455—475. — doi: 10.1016/S0016-7037(03)00457-5.
13. Semenenko V.P., Jessberger E.K., Chaussidon M., Weber I., Stephan T., Wies C. Carbonaceous xenoliths in the Krymka LL3.1 chondrite: Mysteries and established facts // Geochim. et cosmochim. acta. — 2005. — 69. — P. 2165—2182.

Надійшла 09.06.2016

REFERENCES

1. Semenenko, V.P. and Girich, A.L. (2001), *Mineral. Journ. (Ukraine)*, Kyiv, Vol. 23, No 2/3, pp. 15–26.
2. Semenenko, V.P. and Girich, A.L. (2001), *Mineral. Journ. (Ukraine)*, Kyiv, Vol. 23, No 2/3, pp. 27–36.
3. Semenenko, V.P. and Girich, A.L. (2011), *Dop. NAN Ukrainy*, Kyiv, No 11, pp. 107–114.
4. Semenenko, V.P. and Girich, A.L. (2016), *Mineral. Journ. (Ukraine)*, Kyiv, Vol. 38, No 4, (in press).
5. Semenenko, V.P., Kolesov, G.M., Samoilovich, L.G., Golovko, N.V. and Ljul, A.Ju. (1991), *Geokhimiya*, Moscow, No 8, pp. 1111–1121.

6. Semenenko, V.P., Shkurenko, K.O. and Girich, A.L. (2014), *Mineral. Journ. (Ukraine)*, Kyiv, Vol. 36, No 4, pp. 39-49.
7. Yudin, I.A. and Kolomenskij, V.D. (1987), *Mineralogija meteoritov*, Ural. Nauch. Center AN SSSR, Sverdlovsk, RU, 200 p.
8. Huss, G.R., Keil, K. and Taylor, G.J. (1981), *Geochim. et cosmochim. acta*, Vol. 45, pp. 33-51.
9. Nagahara, H. (1985), *Lunar Planet. Sci.*, Vol. 16, pp. 607-608.
10. Semenenko, V.P., Bischoff, A., Weber, I., Perron, K. and Girich, A.L. (2001), *Meteoritics and Planet. Sci.*, Vol. 36, pp. 1067-1085.
11. Semenenko, V.P. and Girich, A.L. (2001), *Meteoritics and Planet. Sci.*, Vol. 36, pp. A187.
12. Semenenko, V.P., Girich, A.L. and Nittler, L.R. (2004), *Geochim. et cosmochim. acta*, Vol. 68, pp. 455-475, doi: 10.1016/S0016-7037(03)00457-5.
13. Semenenko, V.P., Jessberger, E.K., Chaussidon, M., Weber, I., Stephan, T. and Wies, C. (2005), *Geochim. et cosmochim. acta*, Vol. 69, pp. 2165-2182.

Received 09.06.2016

А.Л. Гиріч, В.П. Семененко

Институт геохимии, минералогии и рудообразования
им. Н.П. Семененко НАН Украины
03680, г. Киев-142, Украина, пр-т Акад. Палладина, 34
E-mail: cosmin@i.ua

**ПОРФИРОВИЙ БИТУМОСОДЕРЖАЩИЙ
КСЕНОЛІТ В ХОНДРИТЕ КРИМКА (LL3.1):
1. СТРУКТУРНО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА**

Изложены результаты структурно-минералогического и химического исследования нового ксенолита хондрита Крымка (LL3.1). Ксенолит характеризуется крупнозернистым порфировым строением, наличием крупных включений битумосодержащего вещества, которые сосредоточены главным образом на его периферии, и мелкозернистых полиминеральных ассоциаций, сложенных троилитом, силикатным веществом преимущественно оливинного состава, фосфатами и никелистым железом; наличием дистена (?), который впервые диагностирован в метеоритах и, возможно, имеет метаморфическую природу; неоднородным химическим составом минералов, особенно оливина, низкокальциевого пироксена и хромита; сложной зональностью отдельных зерен низкокальциевого пироксена, что указывает на ритмическую смену окислительно-восстановительных условий его кристаллизации, и высоким содержанием Al_2O_3 и MgO в хромите, что свидетельствует о высокотемпературных условиях его образования. Ксенолит окружен тонкозернистой силикатной каемкой с углеродсодержащим веществом. Главные минералы ксенолита — оливин ($Fa_{6,83-97,0}$), низкокальциевый пироксен ($Fs_{2,64-22,6}En_{75,3-96,7}Wo_{0,50-6,21}$) и троилит, второстепенные — высококальциевый пироксен ($Fs_{3,98-8,27}En_{55,0-63,6}Wo_{28,9-39,0}$) и никелистое железо (тэнит и камасит). Акцессорные минералы представлены хромитом, фосфатами (мерриллитом и редким для хондритов панетитом) и дистеном (?). В межзерновом пространстве сохранились остатки мезостазиса, химический состав которого соответствует нормативному плагиоклазу ($Ab_{69,1-82,3}An_{16,1-30,8}Or_{0,15-2,55}$). Порфировый битумосодержащий ксенолит отличается от известных ксенолитов хондрита Крымка и образовался, вероятно, в результате неравновесной раскристаллизации силикатного расплава.

Ключевые слова: метеорит, хондрит, ксенолит, битум, порфировое строение, минералы, тонкозернистое вещество.

A.L. Girich, V.P. Semenenko

M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy
and Ore Formation of the NAS of Ukraine
34, Acad. Palladina Pr., Kyiv-142, Ukraine, 03680
E-mail: cosmin@i.ua

**PORPHYRITIC BITUMEN-BEARING XENOLITH
WITHIN THE KRYMKA (LL3.1) CHONDRITE:
1. STRUCTURAL-MINERALOGICAL CHARACTERISTIC**

The results of structural-mineralogical and chemical study of a new xenolith within the Krymka (LL3.1) chondrite are given. The xenolith is characterized by coarse-grained porphyritic structure, the presence of coarse inclusions of bitumen-bearing material that are located predominantly on its periphery, fine-grained polymineral associations of troilite, silicate material predominantly of olivine composition, phosphates and nickel iron, first identified in meteorites disthene (?) probably of metamorphic nature, heterogeneous composition of minerals, especially olivine, Ca-low pyroxene and chromite, complicated zoning of some Ca-low pyroxene grains, indicating to rhythmic changing of redox conditions during its crystallization,

and high Al_2O_3 and MgO content in chromite, indicating to the high-temperature conditions of formation. The main minerals of xenolith are olivine ($\text{Fa}_{6.83-97.0}$), Ca-low pyroxene ($\text{Fs}_{2.64-22.6}\text{En}_{75.3-96.7}\text{Wo}_{0.50-6.21}$) and troilite. The secondary ones are Ca-rich pyroxene ($\text{Fs}_{3.98-8.27}\text{En}_{55.0-63.6}\text{Wo}_{28.9-39.0}$) and nickel iron (taenite and kamacite). Accessory minerals are chromite, phosphates (merrillite and rare for chondrites panetite) and disthene (?). Mesostasis residues are preserved in an intergranular space, its chemical composition corresponds to the normative plagioclase ($\text{Ab}_{69.1-82.3}\text{An}_{16.1-30.8}\text{Or}_{0.15-2.55}$). The xenolith is surrounded by a fine-grained rim composed of cryptocrystalline silicate material, fine grains of olivine ($\text{Fa}_{4.86-65.6}$), enstatite ($\text{Fs}_{2.16-2.91}\text{En}_{96.8-97.4}\text{Wo}_{0.03-0.49}$), Ca-rich pyroxene ($\text{Fs}_{5.67-10.3}\text{En}_{45.5-54.6}\text{Wo}_{39.7-44.2}$), kamacite, taenite, troilite and carbon-bearing material. Microchondrules and clasts of fibrous olivine crystals are present within the rim. According to microprobe study a bulk chemical composition of the rim determined as an average of 117 analysis is the following (wt. %): 40.6 FeO; 32.2 SiO_2 ; 11.9 MgO; 3.38 Al_2O_3 ; 1.28 Na_2O ; 0.98 Ni; 0.72 CaO; 0.36 MnO; 0.27 Cr_2O_3 ; 0.24 K_2O ; 0.14 P_2O_5 ; 0.19 S; total — 92.2. The SiO_2/MgO ratio corresponds to 2.7, and $\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$ — 0.77. Porphyritic bitumen-bearing xenolith differs from the known Krymka xenoliths indicating to its most probable formation in result of unequilibrated crystallization of a silicate melt.

Keywords: meteorite, chondrite, xenolith, bitumen, porphyritic structure, minerals, fine-grained material.