

УДК 523.681

Віра Семененко, Аеліта Гіріч, Наталія Кичань

*Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення імені М. П. Семененка НАНУ,
просп. акад. Палладіна, 34, Київ, Україна, 03680,
cosmin@i.ua*

МЕТЕОРИТ З УМОВНОЮ НАЗВОЮ “ВЕЛИКА БАЛКА”: МІНЕРАЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА І КЛАСИФІКАЦІЯ

Наведено результати структурно-мінералогічних досліджень нового метеорита, який умовно (через сумнівні дані щодо обставин його знахідки в Україні) названо “Велика Балка”. За результатами мікрозондових, оптично- та електронно-мікроскопічних досліджень його класифіковано як хондрит L4-5 з ударною стадією S3 і ступенем земного звірювання W3. Індивідуальною особливістю хондрита є підвищений вміст макрохондр і наявність ниткоподібних кристалів хроміту в маскелініті.

Ключові слова: метеорит, хондрит, текстура, мінерали, хондри, хімічний склад, ударний метаморфізм.

У червні 2016 р. у Комітет з метеоритів (КМЕТ) НАН України надійшов взірець кам'яного метеорита (?) для підтвердження його космічної природи та класифікації (рис. 1). Його надіслав після попереднього листування мешканець Одеси Володимир Володимирович Лук'янець.



Рис. 1. Загальний вигляд метеорита (фото В. Лук'янца).

За словами В. Лук'янца, камінь відшукали у червні 2015 р. в с. Велика Балка Одеської обл. (46°34'N; 30°35'E) неподалік від однієї з закинутих вапнякових шахт. Привернули увагу наявна на ньому кора плавлення та висока густина. Місцеві шахтарі розпові-

дали (що досить неякісно зафіксовано аудіопристроєм) про численні знахідки подібного каміння у вапняках і постійне ламання пилок під час зіткнення з ними. Камінь, що його В. Лук'янець вважає метеоритом, певний час зберігався в кабінеті начальника шахти, а пізніше його викинули на вулицю, і місцеві діти використовували його для фіксації футбольних воріт. За словами одесита, камінь має призмоподібну форму, масу 5,557 кг, розміри $14 \times 10 \times 8$ см і цілком укритий чорно-бурою корою плавлення.

З надісланої в КМЕТ НАНУ частини взірця виготовили чотири аншлифи загальною площею близько $6,5 \text{ см}^2$. Структурно-мінералогічні дослідження полірованих шліфів виконано за допомогою оптичного мікроскопа марки ПОЛІАМ Р-312 та сканувального електронного мікроскопа марки JSM-6490LV фірми Jeol (ДУ "ІГНС НАН України"). Хімічний склад зерен нікелістого заліза й сульфідів заліза визначено на енергодисперсійному спектрометрі (ЕДС) марки INCA Penta FETx3, яким обладнаний електронний мікроскоп, а силікатів і хроміту – на мікроаналізаторі марки JXA-8200 фірми Jeol у Техцентрі НАН України (сила струму – 10 нА, прискорювальна напруга – 15 кВ, діаметр зонда – 2 мкм, використано ZAF-поправки; аналітик – В. Соболев). Похибка аналізів на мікроаналізаторі становила 1,5 відн. % для головних елементів і 0,03 абс. % для другорядних.

Дослідження, виконані у відділі космоекології та космічної мінералогії ІГМР НАН України, засвідчили таке.

1. На поверхні кори плавлення метеорита нема жодних ознак його тривалого перебування у вапняках, а також слідів пилки, що ставить під сумнів викопний характер метеорита.

2. Текстура метеорита реліктова хондритова, вміст макрохондр підвищений, наявні чорні ударні жилки (рис. 2, а). Контури хондр нечіткі, а їхні релікти діагностовано завдяки компактності, однорідності будови, а також наявності подекуди оболонки із зерен нікелістого заліза і троїліту. Будова хондр порфірова, скляна, менше – колосникова (див. рис. 2, б), складноколосникова, зерниста, а макрохондр – тільки порфірова.

В одній із сильно тріщинуватих порфірових хондр, навколо якої розташовані великі зерна нікелістого заліза, розмір силікатних кристалів і ступінь їхнього ідіоморфізму зменшуються від центра до периферії, що свідчить про градієнт швидкості охолодження внутрішньої й зовнішньої частин хондри.

У метеориті діагностовано релікт складної колосникової хондри з двома системами олівінових колосників, що перетинаються майже під прямим кутом; у ній мезостазис домінує над кристалічною фазою. Релікт уміщує дрібнішу хондру зернистої будови. Проникнення затверділої зернистої хондри в пластичну колосникову є важливою ознакою їхнього різного агрегатного стану та постійної взаємодії в період агломерації материнського тіла хондрита.

Скло в хондрах розкристалізоване слабо, містить вторинні, часто скелетні силікатні кристали (див. рис. 2, в), іноді – рівномірно розподілені субмікронні зерна хроміту, троїліту й нікелістого заліза. У більшості хондр скло є в підпорядкованій кількості порівняно з кристалічною силікатною фазою.

Макрохондри розміром ≤ 7 мм з чіткими контурами мають кулясту недеформовану форму (що свідчить про їхню агломерацію в твердому, а не пластичному стані), порфірову будову, містять достатньо великі кристали олівіну й піроксену ($\leq 0,5 \times 0,4$ мм), слабо розкристалізований мезостазис із вторинними скелетними кристалами силікатів, частина яких розташована на фазовій межі порфірових кристалів.

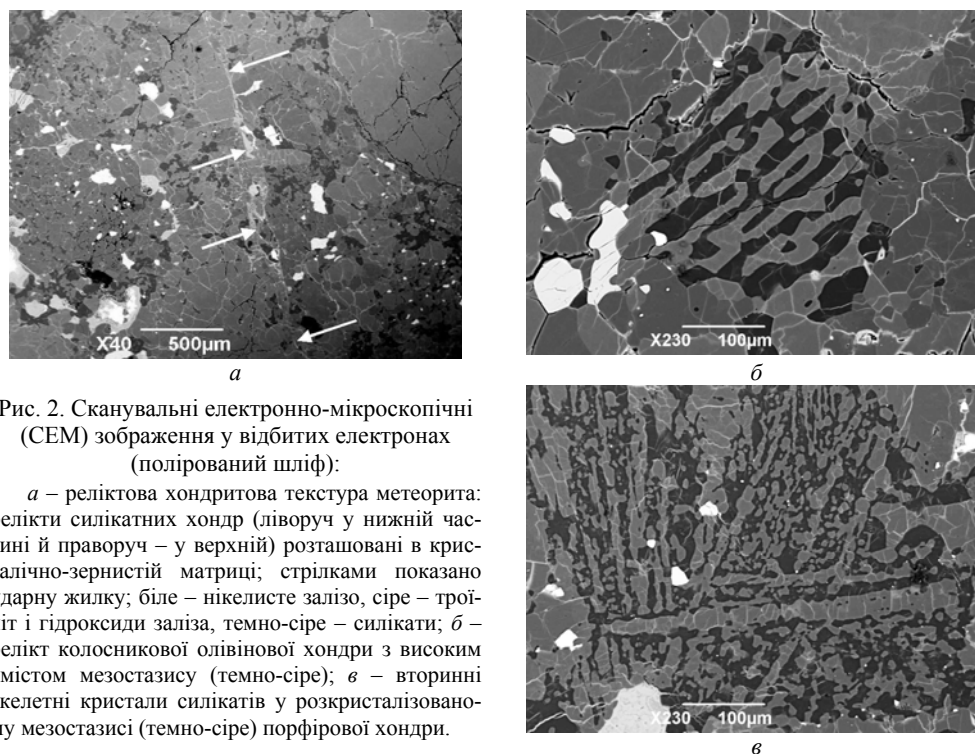


Рис. 2. Сканувальні електронно-мікроскопічні (СЕМ) зображення у відбитих електронах (полірований шліф):

a – реліктова хондритова текстура метеорита: релікти силікатних хондр (ліворуч у нижній частині й праворуч – у верхній) розташовані в кристалічно-зернистій матриці; стрілками показано ударну жилку; біле – нікелисте залізо, сіре – троїліт і гідроксида заліза, темно-сіре – силікати; *б* – релікт колосникової олівінової хондри з високим вмістом мезостазису (темно-сіре); *в* – вторинні скелетні кристали силікатів у розкристалізованому мезостазисі (темно-сіре) порфірової хондри.

Матриця силікатна, нерівномірнотзерниста, з окремими великими зернами й асоціаціями троїліту й нікелистого заліза.

3. Мінеральний склад метеорита ординарний хондритовий: головні мінерали – олівін, піроксен, троїліт, нікелисте залізо (теніт, камасит, грубоструктурний плесит); другорядні – Са-піроксен, плагіоклаз, маскелініт; акцесорні – хроміт, фосфат. Серед непрозорих мінералів троїліт домінує над нікелистим залізом. На відміну від хондр, у матриці визначено вищий вміст і більший розмір зерен Fe,Ni-металу і троїліту.

4. За даними мікрозондового аналізу (див. таблицю), середній склад олівіну відповідає формулі $Fe_{24,5(0,40)}$ *, піроксену – $En_{78,2(0,28)}Fs_{20,6(0,34)}Wo_{1,18(0,24)}$, Са-піроксену – $En_{47,8}Wo_{43,7}Fs_{8,56}$, плагіоклазу – $Ab_{86,2}An_{7,83}Or_{6,02}$. У хроміті визначено підвищений вміст тугоплавких компонентів (межі за трьома аналізами), мас. %: MgO – 2,48–3,36, Al_2O_3 – 1,29–1,38, TiO_2 – 2,85–2,90, V_2O_5 – 0,57–0,65, що свідчить про високотемпературні умови його утворення.

За даними енергодисперсійних досліджень (рис. 3), камасит (14 аналізів) містить у середньому 6,26 мас. % Ni (стандартне відхилення – 0,56) і 1,35 мас. % Co (0,25), теніт (20 аналізів) – 33,4 Ni (7,36) і 0,62 Co (0,25), плесит (два аналізи) – 11,6 Ni (0,74) і 0,89 мас. % Co (0,11).

5. У хондриті наявні численні ознаки ударного метаморфізму, зокрема:

* У дужках наведено стандартне відхилення.

Хімічний склад силікатів у хондриті з умовною назвою “Велика Балка” (L4-5), визначений за допомогою мікрозондового аналізу, мас. %

Оксиди	Олівін ($n = 11$)	Низькокальцієвий піроксен ($n = 6$)	Висококальцієвий піроксен ($n = 1$)	Плагіоклаз ($n = 1$)
SiO ₂	37,60–38,30 (38,10)	55,00–55,70 (55,30)	53,00	64,70
TiO ₂	Н. в.–0,04 (< 0,01)	0,10–0,19 (0,15)	0,40	0,07
Al ₂ O ₃	Н. в.–0,03 (< 0,01)	< 0,02–0,05 (0,04)	0,13	20,40
Cr ₂ O ₃	Н. в.–0,05 (< 0,02)	0,05–0,16 (0,10)	0,86	0,03
MgO	37,70–38,70 (38,30)	28,30–28,60 (28,50)	16,40	Н. в.
FeO	21,60–23,10 (22,10)	13,10–13,80 (13,40)	5,22	0,46
MnO	0,37–0,50 (0,43)	0,42–0,47 (0,44)	0,24	0,04
CaO	Н. в.–0,04 (< 0,01)	0,40–0,72 (0,60)	20,8	1,59
Na ₂ O	Н. в.	Н. в.–0,03 (< 0,02)	0,58	9,69
K ₂ O	Н. в. (< 0,01)	Н. в.	0,05	1,03
P ₂ O ₅	Н. в.–0,22 (0,04)	Н. в.–0,03 (< 0,01)	0,03	0,03
Мінали				
Fa	24,1–25,2 (24,5)			
Fo	74,8–75,9 (75,5)			
Fs		20,2–21,2 (20,6)	8,56	
En		78,0–78,7 (78,2)	47,80	
Wo		0,79–1,42 (1,18)	43,70	
Ab				86,20
An				7,83
Or				6,02

Примітка. Н. в. – не визначено; n – кількість аналізів; у дужках наведено середнє значення.

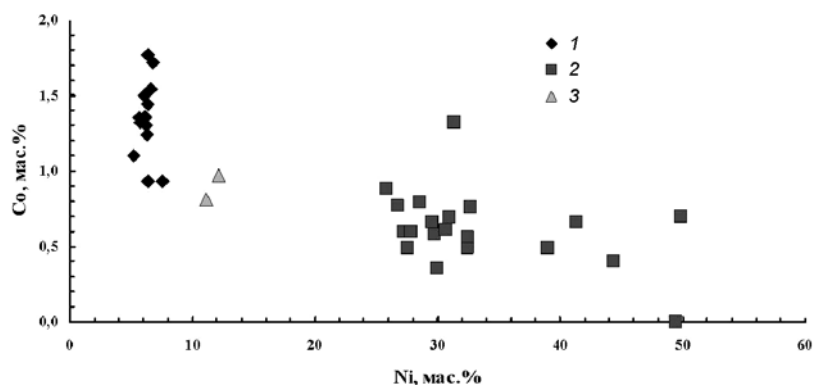


Рис. 3. Вміст Ni та Co у нікелістому залізі хондрита “Велика Балка” (визначено методом ЕДС): 1 – камасит; 2 – теніт; 3 – плесит.

– полікристалічна будова зерен камаситу і троїліту з елементами додаткової деформації (головно, зсування монокристалів один щодо іншого, системи деформаційних пластинок з різною орієнтацією (рис. 4, *a*) у монокристалах полікристалічного троїліту);

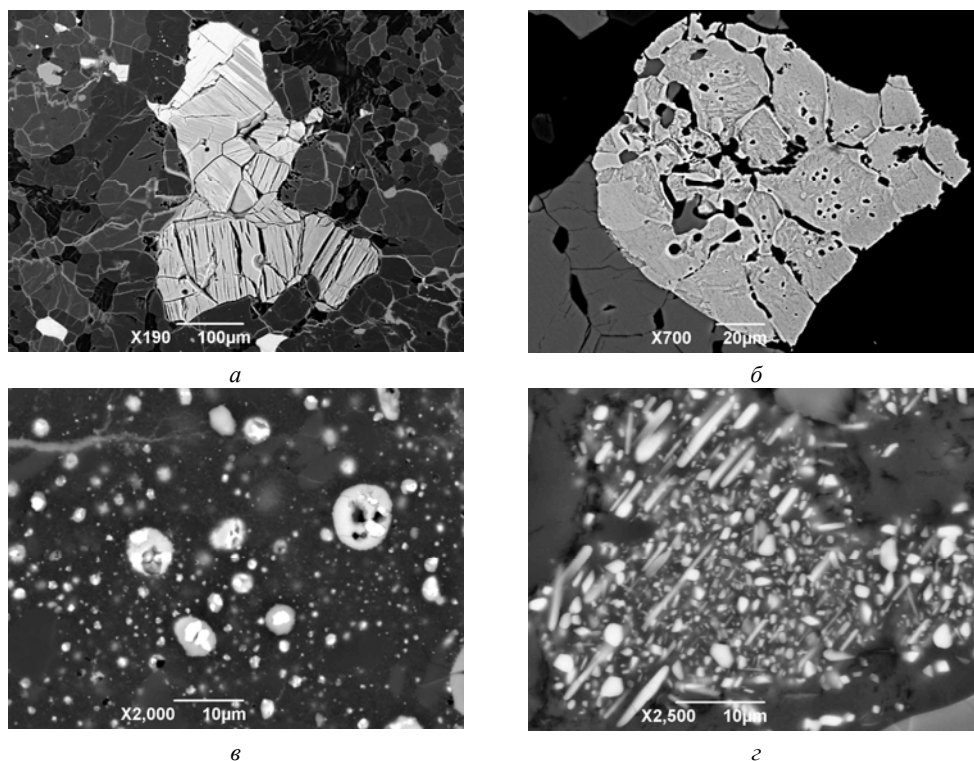


Рис. 4. СЕМ-зображення у відбитих електронах структур ударного метаморфізму в полірованому шліфі хондрита "Велика Балка":

a – різноорієнтовані системи субпаралельних пластинок деформації в монокристалах полікристалічного зерна троїліту; темно-сіре – силікати; *б* – рідкісна полікристалічна будова теніту, монокристали якого мають зональну будову з високонікелістою тенітовою оболонкою навколо мартенситоподібного плеситу; теніт містить багато включень (чорне), окремі з них кубічної форми і можуть бути фосфідом заліза; темно-сіре – троїліт, чорне – силікати; *в* – пілоподібні структури плавлення в чорних ударних жилках, що перерізають хондрит; біле – нікелісте залізо, сіре – троїліт, темно-сіре – маскелініт; *г* – скупчення ідіоморфних і субпаралельних пластинчастих кристалів хроміту, інколи ниткоподібних, у ділянці маскелініту (чорне).

– класична зональна будова зерен теніту й наявність мікрографічного плеситу, інколи мартенситу в теніті; хвилясте і мозаїчне загасання зерен олівіну. Полікристалічні зерна камаситу і троїліту мають чіткі контури великих правильних монокристалів, що, згідно з даними Дж. Вуда [5], свідчить про повторне нагрівання до 400 °С і повільне охолодження деформованих зерен. В одному з великих зерен виявлено неординарну асоціацію полікристалічних камаситу і троїліту з рідкісним полікристалічним тенітом (див. рис. 4, *б*), монокристали якого мають неправильну форму і вміщують мартенситоподібну серцевину, що може бути результатом швидкого охолодження;

– чорні ударні жилки та окремі ділянки, які заповнені маскелінітом, типовими жилкуватими, кулястими, сітчастими, комірчастими й пилоподібними (див. рис. 4, в) структурами плавлення головно троїліту, а також скупченнями мікрочастин хроміту, окремі з яких представлені двома–трьома системами паралельних пластинок або ниткоподібних кристалів (див. рис. 4, з), що нетипово для морфології хроміту й може бути зумовлено дуже високою швидкістю охолодження ударного розплаву.

6. Хондрит містить типові ознаки нерівномірного звітрювання за земних умов, зокрема, різний ступінь заміщення зерен Fe,Ni-металу і троїліту гідроксидами заліза, яке домінує в камаситі, а також прожилки гідроксидів заліза по міжфазових межах мінералів і тріщинах у силікатах. Гідроксидами заліза представлені, найімовірніше, гідрогетитом, зональна будова якого свідчить про різний вміст води в окремих зонах навколо звітрених зерен камаситу.

7. За структурно-мінералогічними характеристиками та хімічним складом мінералів метеорит класифіковано [1] як хондрит L4-5 з ударною стадією S3 [3] та ступенем звітрювання W3 [4]. У метеориті збереглися ознаки щонайменше його дворазового зіткнення з іншими тілами в поясі астероїдів. Значення ударного тиску під час повторного удару було менше, ніж під час першого, тому в метеориті з'явилися тільки крихкі й пластичні деформації.

Отже, головні структурно-мінералогічні особливості метеорита такі:

1) наявність підвищеної кількості силікатних макрохондр, що свідчить про агрегацію материнського тіла хондрита, імовірно, у ділянці протопланетної туманності зі зниженою інтенсивністю їхніх взаємних зіткнень і фрагментації;

2) пластинчаста й ниткоподібна форма кристалів хроміту в ударних розплавах, що є доказом значної швидкості їхнього охолодження.

За результатами виконаних досліджень хондрит названо “Велика Балка” умовно, оскільки зроблено висновок про сумнівність даних щодо його знахідки не тільки у вапняках, а й загалом на території України. Зважаючи на сучасний ажіотаж навколо метеоритів та їхню комерційну ціну, ми вимушені припустити значну ймовірність його купівлі на одному з метеоритних базарів поза межами України й надання невірогідних даних у Комітет з метеоритів НАНУ для легалізації взірця та його подальшого продажу за вищою ціною. На жаль, такі випадки не поодинокі, і якщо для фрагментарних взірців залізних метеоритів можна відразу оцінити ступінь вірогідності їхньої знахідки на теренах України, то для кам'яних це досить важко. Отже, останній метеорит, який відшукали на території України й безкоштовно передали до КМЕТ НАНУ співробітники Кірово-ської експедиції, – це хондрит *Грузьке* [2].

Автори щиро вдячні В. Соболеву та В. Сливінському за технічну допомогу під час виконання мікрозондових та електронно-мікроскопічних досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Семененко В. Структурно-мінералогічна класифікація метеорита з умовною назвою “Велика Балка” / Віра Семененко, Аеліта Гіріч, Наталія Кичань // Мінерал. зб. – 2018. – № 68, вип. 1. – С. 146–148.
2. Структурно-мінералогічні особливості кам'яного метеорита *Грузьке* / В. Семененко, А. Гіріч, Н. Кичань, С. Ширінбекова // Мінерал. зб. – 2010. – № 60, вип. 1. – С. 59–69.

3. *Stöffler D.* Shock metamorphism of ordinary chondrites / D. Stöffler, K. Keil, E. R. D. Scott // *Geochim. Cosmochim. Acta.* – 1991. – Vol. 55. – P. 3845–3867.
4. *Wlotska F.* A weathering scale for the ordinary chondrites (abstract) / F. Wlotska // *Meteoritics.* – 1993. – Vol. 28. – P. 460.
5. *Wood J. A.* Chondrites: Their metallic minerals, thermal histories, and parent planet / J. A. Wood // *Icarus.* – 1967. – Vol. 6, N 1. – P. 1–49.

*Стаття: надійшла до редакції 28.10.2018
прийнята до друку 21.12.2018*

Vira Semenenko, Aelita Hirich, Nataliia Kychan

*M. P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of NASU,
34, Acad. Palladin Av., Kyiv, Ukraine, 03680,
cosmin@i.ua*

METEORITE WITH CONVENTIONAL NAME “VELYKA BALKA”: MINERALOGICAL CHARACTERISTIC AND CLASSIFICATION

The results of structural and mineralogical study of meteorite with conventional name “Velyka Balka” are given. Because of absence of reliable dates from the meteorite owner, its finding circumstances caused strong doubt in the sample finding in Ukraine.

On the base of optical, electron microscopy and microprobe investigations the meteorite is classified as L4-5 chondrite with shock stage S3 and weathering scale W3. The microprobe data indicate to a low variation in a composition of olivine ($\text{Fa}_{24.1-25.2}$) and Ca-low pyroxene ($\text{En}_{78.0-78.7}\text{Fs}_{20.2-21.2}\text{Wo}_{0.79-1.42}$). Composition of Ca-rich pyroxene corresponds to $\text{En}_{47.8}\text{Wo}_{43.7}\text{Fs}_{8.56}$ and plagioclase – to $\text{Ab}_{86.2}\text{An}_{7.83}\text{Or}_{6.02}$.

The chondrite contains such evidences of shock metamorphism: (1) polycrystalline structure of kamacite and troilite grains with signs of additional deformation; (2) the presence of zone grains of taenite, coarse plesite and relics of martensite within the taenite grains; (3) wave and mosaic extinction of olivine grains; (4) the presence of shock melted veins and pockets with maskelynite containing melted troilite and chromite microcrystals.

Signs of at least double collision of a parent body of the meteorite with other bodies in the asteroids belt are preserved. The second impact was less intense than the first one and caused formation of fragile and plastic deformations in the meteorite. Enhanced content of macrohondrules and the presence of filiform crystals of a chromite in maskelynite are individual features of the chondrite.

Key words: meteorite, chondrite, texture, minerals, chondrules, chemical composition, shock metamorphism.