

<https://doi.org/10.15407/mineraljournal.43.02.029>
УДК 523.681

В.П. Семененко, д-р геол.-мін. наук, чл.-кор. НАН України, проф., зав. від.
Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України
03142, м. Київ, Україна, пр-т Акад. Палладіна, 34
E-mail: cosmin@i.ua; <https://orcid.org/0000-0003-1479-6874>

А.Л. Гіріч, канд. геол. наук, старш. наук. співроб.
Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України
03142, м. Київ, Україна, пр-т Акад. Палладіна, 34
E-mail: cosmin@i.ua; <https://orcid.org/0000-0002-0708-2753>

К.О. Шкуренко, канд. геол. наук, наук. співроб.
Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України
03142, м. Київ, Україна, пр-т Акад. Палладіна, 34
E-mail: cosmin@i.ua; <https://orcid.org/0000-0002-2665-5916>

Н.В. Кичань, канд. геол. наук, наук. співроб.
Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України
03142, м. Київ, Україна, пр-т Акад. Палладіна, 34
E-mail: cosmin@i.ua; <https://orcid.org/0000-0002-6793-6538>

МАКРОХОНДРИ В ДЕЯКИХ ХОНДРИТАХ:

1. СТРУКТУРНО-МІНЕРАЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА

Наведено результати структурно-мінералогічного і хімічного дослідження рідкісних текстурних одиниць хондритів — макрохондр та їх уламків, яких знайдено у 5 хондритах різних хімічних груп та петрологічних типів (Allende CV3, Кримка LL3.1, Саратов L4, "Велика Балка" L4-5, Château-Repard L6). За своїми характеристиками більшість з них загалом подібні до звичайних хондр та досліджених раніше макрохондр. Вони мають ексцентрично-променисту і порфірову будову, складені олівіном і піроксеном, покриті силікатною оболонкою — тонкозернистою в нерівноважних хондритах і грубозернистою у рівноважних. Серед вивчених нами макрохондр лише дві є неординарними і свідчать про специфічні умови їх утворення в протопланетній газо-пиловій туманності. Перша, виділена безпосередньо з хондрита Allende, характеризується наявністю на поверхні тонкої аморфної оболонки з пористою будовою і з однозначними скульптурними ознаками миттєвого оплавлення та загартування поверхневого силікатного шару. Друга, вивчена в полірованому шліфі метеорита Кримка, — зональною будовою, наявністю зерен графіту і, можливо, включень бітуму. За відношенням SiO_2/MgO тонкозерниста силікатна оболонка з рідкісними кристалами графіту і можливо включеннями бітуму відповідає тонкозернистим оболонкам звичайних хондр, а не вуглистій речовині метеоритів.

Ключові слова: метеорит, хондрит, макрохондра, структура, мінерали, скульптура поверхні.

Вступ. Класична текстура звичайних хондритів передбачає наявність двох головних, відмінних за походженням, текстурних одиниць. Це — тонкозерниста матриця, тобто акреціат нанометричних і субмікронних зерен силікатного і

металічного пилу протопланетної туманності, який ніколи не нагрівався до температури плавлення, а також хондри — високотемпературний продукт миттєвого переплавлення мінерального пилу.

Цитування: Семененко В.П., Гіріч А.Л., Шкуренко К.О., Кичань Н.В. Макрохондри в деяких хондритах: 1. Структурно-мінералогічна характеристика. *Мінерал. журн.* 2021. 43, № 2. С. 29—39. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.43.02.029>

Якщо не враховувати ксеноліти, то в міжхондровому просторі нерівноважних хондритів є не лише релікти допланетного пилу у вигляді тонкозернистої примітивної речовини, а і грубозернисті компоненти — фрагменти хондр, а також великі силікатні і металічні зерна. Частина силікатних зерен має досконалу кристалічну форму і за розміром та формою може зіставлятися з кристалами великих порфірових хондр. Ця морфологічна особливість дає підстави припустити їх формування із крапель розплаву в період хондроутворення з наступним дробленням і відокремленням внаслідок імпактних процесів у протопланетній туманності. Водночас існує думка про кристалізацію таких кристалів безпосередньо із газової фази в протопланетній туманності. Згідно з електронно-мікроскопічним дослідженням скульптури поверхні, деякі досконалі кристали олівину із матриці вуглистої хондрита *Murchison (CM2)* мають найімовірніше конденсаційну природу [16].

Наразі зібрано великий фактичний матеріал про хондри, які утворились у протопланетній туманності і перебували в умовах безперервного руху, зіткнень одна з одною та дроблення, що породило уламковий матеріал у доагломераційний період, як джерело грубозернистих компонентів матриці нерівноважних хондритів. За розміром хондри поділяють на три групи: мікрохондри ≤ 10 мкм [10], класичні (домінуючі) — ≤ 5 мм, макрохондри — ≥ 5 мм [17, 20]. Якщо мікрохондри є звичайним [18], але не повсюдним [10] компонентом тонкозернистої примітивної речовини метеоритів, то макрохондри — рідкісною текстурною одиницею хондритів [15]. Обмежена кількість макрохондр може пов'язуватися або з певною специфікою процесу їх утворення, дещо відмінною від формування класичних хондр [13, 17, 20], або з ординарністю формування макрокрапель силікатного розплаву [14] з наступним пріоритетним дробленням макрохондр у газо-пиловій туманності [5, 8].

Враховуючи рідкісність макрохондр у метеоритах, нові дані про структурно-мінералогічні і хімічні характеристики кожної знахідки є актуальними і важливими для з'ясування умов їх утворення та еволюції. За тривалий період досліджень нами знайдено силікатні макрохондри у п'яти хондритах різних хімічних груп та петрологічних типів, дві з яких є унікальними і важливими для розуміння природи макрохондр.

Об'єкти і методи досліджень. Макрохондри та їх уламки знайдено і вивчено у вуглистому хондриті *Allende (CV3)* та звичайних хондритах Кримка (*LL3.1*), Саратов (*L4*), "Велика Балка" (*L4-5*) і *Château-Renard (L6)*. Слід зауважити, що назва метеорита "Велика Балка" є умовною [4], оскільки дані про його знахідку в Одеській області в шахті у вапнякових відкладах викликають великий сумнів у достовірності, що унеможливорює його реєстрацію у світовому каталозі метеоритів (*Meteoritical Bulletin Database*). За персональним повідомленням професора А. Бішофа (Інститут Планетології, Мюнстер, Німеччина), метеорит не був знайденим у шахті, а має сучасну земну історію, на що вказують результати ізотопного дослідження його земного віку. Однією з особливостей хондрита "Велика Балка" є наявність у ньому підвищеної кількості макрохондр [4], що потребує їх детального дослідження незалежно від "законної чи незаконної" земної історії метеорита.

Макро- та мікроскопічні дослідження проводились з використанням біокуляра МБС-10 та оптичних мікроскопів МИН-8, МИН-9 (для хондрита Саратов), ПОЛАМ Р-312 (для хондритів Кримка, "Велика Балка") і *Nikon ECLIPSE LV100POL* (для хондрита Кримка). Електронно-мікроскопічне дослідження скульптури поверхні хондр хондрита *Allende* проведено на растровому електронному мікроскопі РЕМ-2 (Київський національний університет імені Тараса Шевченка, аналітик І. Козлов) та на автоемісійному сканувальному електронному мікроскопі марки *JSM-6700F* фірми *Jeol*, який обладнаний енергодисперсійним спектрометром (*EDS*) марки *JED-2300* (Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення (ІГМР) ім. М.П. Семененка НАН України). Детальне вивчення структурно-мінералогічних особливостей макрохондр та їх уламків у полірованих шліфах метеоритів проведено за допомогою сканувального електронного мікроскопа марки *JSM-6490LV* фірми *Jeol*. Цей мікроскоп обладнаний *EDS* марки *INCA Penta FET* $\times 3$, що дало змогу отримати хімічний склад деяких мінеральних зерен (ДУ "Інститут геохімії навколишнього середовища (ІГНС) НАН України", аналітик В.М. Сливінський).

Хімічний склад мінеральних зерен визначено на мікроаналізаторах марки *JXA-733* (для хондрита Саратов) і *JXA-8200* (для хондрита Кримка) фірми *Jeol* (Техцентр НАН України, аналітик В.Б. Соболев), а також *Camebax-36*



Рис. 1. Сканувальне електронно-мікроскопічне зображення у вторинних електронах (SE) макрохондри 1 з хондрита Allende: *a* — загальний вигляд кори плавлення на поверхні макрохондри. В місцях зламу кори видно зернисту будову приповерхневої зони макрохондри; *b* — чіткий контакт аморфної кори плавлення з приповерхневою силікатною зоною макрохондри; *c* — поверхня зламу кори плавлення та її контакт з внутрішньою частиною макрохондри. На зламі чітко видно, що кора плавлення має пористу внутрішню зону; *d* — лам внутрішньої частини макрохондри, на якому видно її ексцентрично-променисту будову

Fig. 1. Scanning electron microscopic images in secondary electrons (SE) of the macrochondrule 1 from the Allende chondrite: *a* — a general view of a melted crust on the macrochondrule surface. A granular texture of subsurface zone is visible on the broken areas of the macrochondrule; *b* — a distinct contact of the amorphous melted crust with the macrochondrule subsurface silicate zone; *c* — a broken surface of the melted crust and its contact with an inner part of the macrochondrule. The broken surface clearly shows a porous inner zone of the melted crust; *d* — the broken surface, which shows a radial texture of the macrochondrule inner part

(для хондрита *Château-Renard*; Національний музей Природознавства Франції, Париж) з використанням сили струму 10 нА та прискорювальної напруги 15 кВ для силікатних і 25 кВ для металічних фаз; діаметр зонда 2 мкм. За стандарт обирали відомі природні мінерали. Під час оброблення результатів рентгеноспектральних досліджень використовувалась ZAF-поправка. Похибка аналізу становить 1,5 відн. % для головних елементів і 0,02 абс. % для другорядних (для *Camebax-36* — 0,5 відн. %). Валовий хімічний склад тонкозернистих оболонок визначено розфокусованим зондом (діаметром до 20 мкм) за окремими точками в межах однорідних за будовою ділянок.

Дифрактограми для тонкозернистих силікатних уламків з хондрита Кримка, отримані на апараті ДРОН-1, трубка БСВ-8, з використанням CuK_α випромінювання, сили струму 20 мА і напруги 38 кВ, швидкість лічильника — $1^\circ/\text{хв}$ (Львівський національний університет імені Івана Франка, аналітик В.С. Мельников).

Структурно-мінералогічні особливості макрохондр. Далі представлено основні структурно-мінералогічні і хімічні характеристики знайдених і досліджених нами макрохондр у п'яти хондритах. На жаль, рівень вивчення макро-

хондр у хондритах різний, що зумовлено мінералогічними особливостями і значенням для з'ясування їх природи. Зокрема, це стосується знахідки унікальної полізональної графітовмісної макрохондри в метеориті Кримка, яка порівняно з іншими макрохондрами вивчена досить детально.

Макрохондри у вуглистому хондриті Allende (CV3). У різні періоди в метеориті виявлено дві макрохондри.

Макрохондра 1 знайдена ще на початку 1980-х років і виділена серед мінеральної фракції, що викришилась із метеорита [1]. Під біноклем вона характеризується гладенькою поверхнею і наявністю тонкої оплавленої кірочки чорного кольору. Форма хондри куляста, а діаметр 8 мм.

Згідно зі сканувальним електронно-мікроскопічним дослідженням, поверхня макрохондри злегка горбиста, а чорна кірочка представлена тонким шаром силікатного скла (рис. 1, *a*, *b*). У місцях надлому макрохондри чітко видно, що, аналогічно корі плавлення хондритів, скляна кірочка складається із двох зон: внутрішньої — товщиною ≤ 20 мкм, яка має пористу будову (рис. 1, *c*), і суцільної зовнішньої — товщиною ≤ 1 мкм. Пори характеризуються округлою або неправильною формою, часто



Рис. 2. SE-зображення скульптури поверхні кори плавлення макрохондри 1 з хондрита Allende: a — скупчення округлих дірок натягування, крізь які видно тонкозернисту будову внутрішньої зони кори плавлення; b — лінійні скульптури на поверхні кори плавлення, які пов'язані з внутрішньою будовою макрохондри; c — депресії з вертикальними стінками, що утворилися в результаті виходу газів із середини макрохондри. Поверхня кори плавлення характеризується частковою розкристалізацією; d — ділянка тонкорозкристалізованої кори плавлення, розмір силікатних кристалів в якій — від субмікронного до нанометрового

Fig. 2. SE-images of melted crust surface sculptures of the macrochondrule 1 from the Allende chondrite: a — an accumulation of the round tension holes with visible a fine-grained structure of the melted crust inner zone; b — linear sculptures on the melted crust surface, related to a macrochondrule internal texture; c — depressions with vertical walls, formed in result of gas outlet from the macrochondrule internal zone. The melted crust surface is characterized by a partial recrystallization; d — an area of the fine-recrystallized melted crust, with silicate crystals ranging in a size from submicrons to nanometers

поєднані між собою і в деяких випадках виходять на поверхню макрохондри. Завдяки зламу видно складну ексцентрично-променисту будову (рис. 1, d) макрохондри, системи субпаралельних силікатних пластинок, в якій представлені піроксеном і розташовані в трьох напрямках.

Поверхня кірочки характеризується наявністю округлих дірок натягування (рис. 2, a), крізь які проявилася тонкозерниста будова внутрішньої зони, паралельні лінійні скульптури (рис. 2, b), як відображення внутрішньої будови макрохондри, а також депресії, зумовлені виходом газів з середини (рис. 2, c). За умови великого збільшення видно, що в деяких ділянках скляна кірочка частково розкристалізована і представлена округлими силікатними зернами нанометрового розміру (рис. 2, d).

Макрохондра 2 розміром 6×4 мм, кулястої форми і чорного кольору відібрана на зламі одного із індивідуальних зразків хондрита Allende. Макрохондра (рис. 3, a) перетинається крихкими тріщинами деформації, які утворилися найімовірніше у ході її відбору, а її поверхня покрита тонкою неблiskучою кірочкою з видимими навіть під бінокуляром лінійними елементами у вигляді борозен. Під електронним мікроскопом лінійні елементи представлені субпаралельними смугами аморфної (склува-

тої) силікатної речовини (рис. 3, b). Смугастість поверхні чітко проявляється за умови великого збільшення (рис. 3, c), що найімовірніше є зовнішнім відображенням ексцентрично-променистої будови і піроксенового складу макрохондри. Цікаво, що всі смуги мають плавні контури, як, можливо, свідчення часткової оплавленості поверхні, що також підтверджується частково аморфізованою і пористою будовою зовнішньої зони оболонки, яку вдалося дослідити на її вертикальному відколі (рис. 3, d).

Макрохондри в хондриті Кримка (LL3.1). В метеориті виявлено дві (полізональна графітовмісна і звичайна силікатна) макрохондри і дуже великий уламок макрохондри. Всі вони характеризуються наявністю тонкозернистої силікатної оболонки, що є прямим доказом знаходження їх у пиловому довірлі протопланетної туманності. Також на зламі деяких індивідуальних зразків метеорита чітко виділяються великі уламки, які складені світло-сірою однорідною силікатною речовиною і можуть належати до фрагментів макрохондр.

Полізональна графітовмісна макрохондра виявлена на поверхні зламу одного із зразків метеорита, з якого виготовлено полірований шліф [2, 3, 19]. Її розміри на поверхні полірованого шліфа 7×4 мм, форма — овальна, будо-

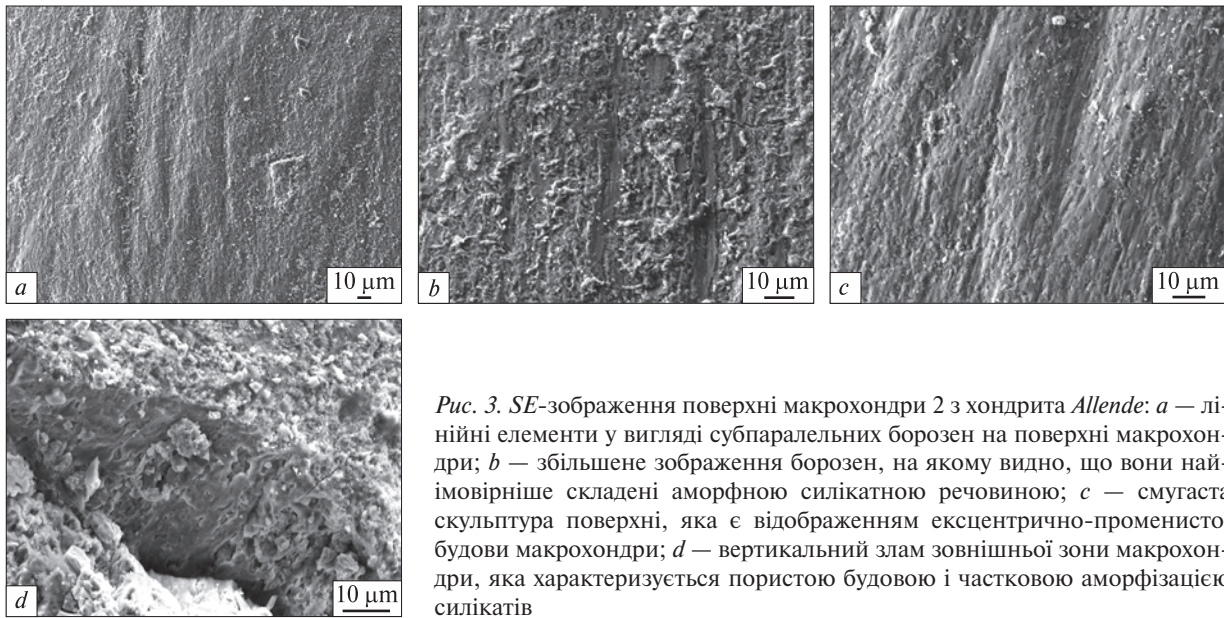


Рис. 3. SE-зображення поверхні макрохондри 2 з хондрита Allende: *a* — лінійні елементи у вигляді субпаралельних борозен на поверхні макрохондри; *b* — збільшене зображення борозен, на якому видно, що вони найімовірніше складені аморфною силікатною речовиною; *c* — смугаста скульптура поверхні, яка є відображенням ексцентрично-променистої будови макрохондри; *d* — вертикальний злам зовнішньої зони макрохондри, яка характеризується пористою будовою і частковою аморфізацією силікатів

Fig. 3. SE-images of the macrochondrule 2 surface from the Allende chondrite: *a* — linear elements that form subparallel grooves on the macrochondrule surface; *b* — an enlarged area of the grooves showing that one's are probably composed of an amorphous silicate material; *c* — a striped surface sculpture due to the macrochondrule radial texture; *d* — a vertical fracture surface of the macrochondrule outer zone, characterized by a porous structure and partial amorphization of silicates



Рис. 4. Оптично-мікроскопічне у відбитому світлі (*a*) та СЕМ-зображення (*b–d*) у відбитих електронах (BSE) полізональної графітовмісної макрохондри в полірованому шліфі метеорита Кримка: *a* — загальний вигляд макрохондри, яка складається з силікатної серцевини, двох метал-троїлітових мантий (білі) і тонкозернистої оболонки (світло-сіре). Сіре — силікати; *b* — збільшене зображення макрохондри, на якому чітко видно її хвилясті контури, а також тонкозернисту оболонку (світло-сіре); *c* — зерна графіту (чорне) в асоціації з нікелістим залізом (біле) і троїлітом

(світло-сіре) у зовнішній мантиї макрохондри. Сіре, темно-сіре — силікати; *d* — ідіоморфний кристал графіту (чорне) в тонкозернистій оболонці макрохондри. Від світло- до темно-сірого — силікати, біле — троїліт

Fig. 4. Optical-microscopic in reflected light (*a*) and SEM-images (*b–d*) in backscatter electrons (BSE) of a polyzonal graphite-bearing macrochondrule in a polished section of the Krymka meteorite: *a* — a general view of the macrochondrule, which consists of a silicate core, two metal-troilite mantles (white) and fine-grained rim (light gray). Gray — silicates; *b* — an enlarged image of the macrochondrule, that clearly shows its wavy outlines and the fine-grained rim (light gray); *c* — graphite grains (black) in association with Fe,Ni-metal (white) and troilite (light gray) within the macrochondrule outer mantle. Gray, dark-gray — silicates; *d* — an euhedral graphite crystal (black) within the macrochondrule fine-grained rim. From light to dark gray — silicates, white — troilite

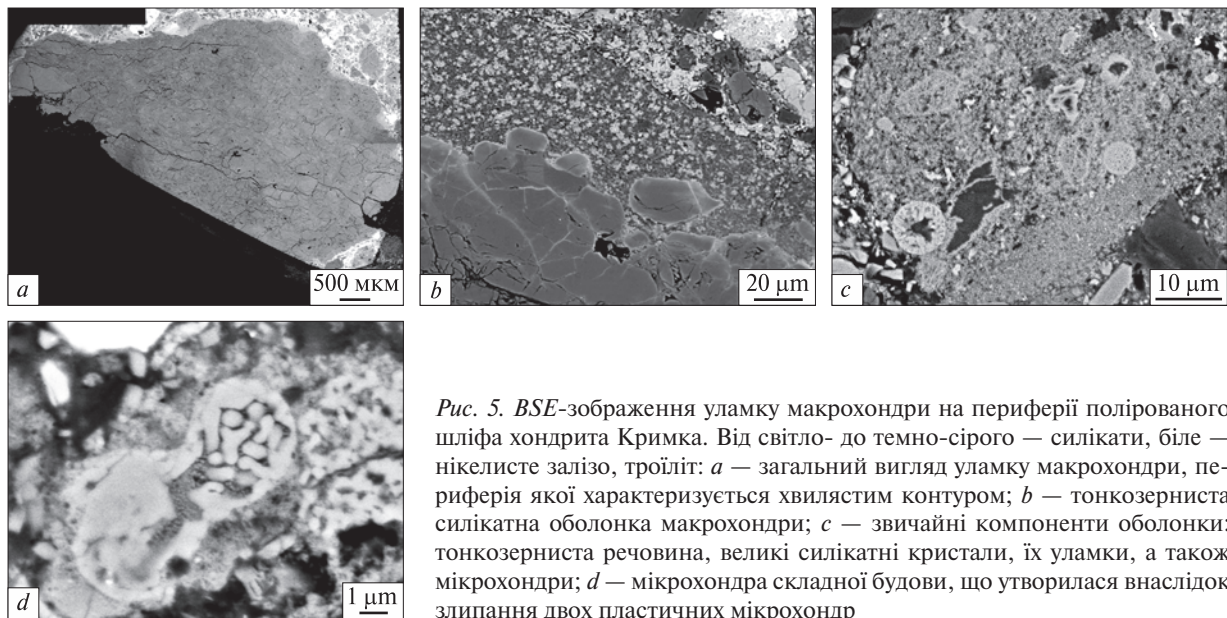


Рис. 5. BSE-зображення уламку макрохондри на периферії полірованого шліфа хондрита Кримка. Від світло- до темно-сірого — силікати, біле — нікелісте залізо, троїліт: *a* — загальний вигляд уламку макрохондри, периферія якої характеризується хвилястим контуром; *b* — тонкозерниста силікатна оболонка макрохондри; *c* — звичайні компоненти оболонки: тонкозерниста речовина, великі силікатні кристали, їх уламки, а також мікрохондри; *d* — мікрохондра складної будови, що утворилася внаслідок злипання двох пластичних мікрохондр

Fig. 5. BSE-images of a macrochondrule fragment on the periphery of the Krymka chondrite polished section. From light to dark gray — silicates, white — Fe,Ni-metal, troilite: *a* — a general view of the macrochondrule fragment. The macrochondrule periphery is characterized by a wavy outline; *b* — a fine-grained silicate rim of the macrochondrule; *c* — an ordinary components of the rim: a fine-grained material, coarse silicate crystals, their fragments and microchondrules; *d* — a complex structure of microchondrule formed due to adhesion of two plastic microchondrules

ва — полізональна. Макрохондра (рис. 4, *a*) складається із силікатної серцевини, внутрішньої метал-троїлітової мантиї, а також реліктив зовнішньої метал-троїлітової мантиї і зовнішньої силікатної зони (рис. 4, *b*). Серцевина має порфірову будову, а мантиї — ліквацийну з домінуванням Fe,Ni-металу у внутрішній, а троїліту — у зовнішній мантиї.

Мінерали макрохондри представлені переважно силікатами (олівін, піроксен, Са-піроксен, плагіоклаз), нікелістим залізом (камасит, теніт) і троїлітом, меншою мірою графітом (рис. 4, *c*), акцесорними зернами самородної міді та кремнезему. Хімічний склад мінералів неоднорідний і характеризується коливанням від зерна до зерна, а також у межах зерен. Наявність графіту є основною мінералогічною особливістю макрохондри. Він асоціює з нікелістим залізом і троїлітом у внутрішній і, головним чином, зовнішній мантиях макрохондри. У схрещених ніколях оптичного мікроскопа графіт має дуже тонкозернисту будову [3], однак під електронним мікроскопом видно, що частина зерен є аморфною і представлена найімовірніше ділянками бітуму [6].

Тонкозерниста оболонка макрохондри відмінна від класичних оболонок хондр наявністю поодиноких мікронних кристалів графіту

(рис. 4, *d*), С-збагачених ділянок (ймовірно бітуму) і високотемпературних мінералів — гібоїту, діопсиду, форстериту, енстатиту, анортиту, Mg,Al-шпінелі та продуктів її низькотемпературних змін — Fe,Al-шпінелі, що може бути свідченням її вуглистої природи. Валовий хімічний склад характеризується низькою аналітичною сумою (94,4) у зв'язку з наявністю пор, С-вмісної речовини, графіту і гідроксидів заліза. Однак, всупереч мінеральному складу, за відношенням SiO_2/MgO (3,20) і $\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$ (0,87) оболонка макрохондри повністю відповідає оболонкам звичайних хондр метеорита Кримка [11], а не вуглистим хондритам.

Силікатна макрохондра світло-сірого кольору, розміром 11×9 мм і округлої форми виявлена в одному із полірованих шліфів індивідуального зразка 1290/33 метеорита Кримка. Вона покрита тонкою силікатною оболонкою, яка під бінокуляр має чорний колір, а під оптичним та електронним мікроскопами — світло-сірий. Структура макрохондри — порфірова; порфірові кристали розміщені в мезостазисі і представлені олівіном та піроксенами, які вміщують мікронні округлі зерна нікелістого заліза, троїліту, меншою мірою — зерна хроміту із зародками граней. Силікатна оболонка має тонкозернисту будову, складена олі-



Рис. 6. BSE-зображення макрохондри в полірованому шліфі хондрита "Велика Балка": *a* — загальний вигляд макрохондри порфірової будови з грубозернистою силікатною оболонкою. Від світло- до темно-сірого — силікати, білі — нікелісте залізо, троїліт; *b* — порфірові кристали олівіну і піроксену призматичної форми, які розташовані у плагіоклазовому мезостазісі (темно-сіре); *c* — ксеноморфні полікристалічні зерна силікатів другої генерації, що складені ізометричними монокристалами і розташовані у мезостазісі (темно-сіре) макрохондри; *d* — скупчення субмікронних кристалів хроміту (білі) в мезостазісі (темно-сіре) макрохондри

Fig. 6. BSE-images of a macrochondrule in a polished section of the "Velyka Balka" chondrite: *a* — a general view of the macrochondrule porphyritic texture with a coarse-grained silicate rim. From light to dark gray — silicates, white — nickel iron, troilite; *b* — olivine and pyroxene porphyritic crystals with prismatic shape, located within a plagioclase mesostasis (dark gray); *c* — xenomorphic polycrystalline silicate grains of second generation, composed of isometric monocrystals and located within the macrochondrule mesostasis (dark gray); *d* — an accumulation of the submicron chromite crystals (white) within the macrochondrule mesostasis (dark gray)

віном і піроксеном з деякими субмікронними зернами Fe,Ni-металу і троїліту.

Частина уламку силікатної макрохондри розміром $7,5 \times 3,8$ мм знайдена на периферії полірованого шліфа метеорита (рис. 5, *a*). На жаль, уламок обрізаний на одній із сторін, що не дає можливості коректно визначити його розміри. По формі він відповідає видовженій половині еліпса з хвилястим дугоподібним контуром, який покритий тонкозернистою оболонкою (рис. 5, *b*), і з прямим зрізаним краєм. Структура макрохондри порфірова, а мінеральний склад представлений олівіном, піроксенами, плагіоклазовим мезостазісом і акцесорними мікронними зернами нікелістого заліза, троїліту, ільменіту і Са-фосфату.

Хімічний склад мінералів макрохондри, визначений за допомогою ЕДС, характеризується помірними варіаціями і має у середньому (мас. %) для 44 зерен олівіну — 47,6 MgO; 40,6 SiO₂; 11,5 FeO; 0,18 CaO та 0,10 MnO; (Fa₁₂); для 24 зерен піроксену — 57,0 SiO₂; 34,2 MgO; 5,09 FeO; 2,16 CaO; 0,87 Al₂O₃; 0,48 Cr₂O₃; 0,08 MnO; 0,04 TiO₂; ≤0,02 Na₂O та ≤0,01 K₂O; (Fs_{7,40}En_{88,6}Wo_{4,03}); для 22 зерен Са-піроксену — 53,2 SiO₂; 21,6 MgO; 15,6 CaO; 4,83 FeO; 2,76 Al₂O₃; 1,12 TiO₂; 0,69 Cr₂O₃; 0,12 MnO; ≤0,01 Na₂O та K₂O; (Fs_{7,63}En_{60,8}Wo_{31,6}); для

14 ділянок плагіоклазового мезостазісу — 47,0 SiO₂; 33,9 Al₂O₃; 17,7 CaO; 1,38 Na₂O; 0,08 K₂O; (Ab_{12,1}An_{87,5}Or_{0,42}). У зв'язку з мікронним розміром більшості акцесорних мінералів їх хімічний склад необхідно враховувати як орієнтовний. Так, у середньому для 13 зерен ільменіту він має 60,2 TiO₂; 39,8 FeO; для трьох зерен Са-фосфату — 52,0 P₂O₅ і 48,0 CaO, для двох точок камаситу — 92,2 Fe; 4,87 Ni; 2,91 Co, для двох точок теніту — 53,7 Ni; 45,2 Fe; 1,14 Co.

Тонкозерниста оболонка складена силікатною речовиною з типовим набором мінералів — домінуючі олівін і піроксени, а також акцесорії мікронних зерен нікелістого заліза і троїліту. Як рідкісний компонент в ній є мікрохондри однорідної, порфірової, ексцентрично-променистої та складної будови, які представлені (рис. 5, *c*, *d*) олівіном, піроксеном і плагіоклазом. Незалежно від розміру, олівінові зерна і мікрохондри мають зональну будову, що вказує на їх окиснення в протопланетній туманності ще в доакреційний період. За даними енергодисперсійних досліджень 140 ділянок, валовий хімічний склад тонкозернистої оболонки відповідає у середньому (мас. %): 1,62 Na₂O; 14,2 MgO; 5,33 Al₂O₃; 40,9 SiO₂; 0,08 P₂O₅; 0,24 S; 0,51 K₂O; 2,65 CaO; 0,03 TiO₂; 0,02 V₂O₅; 0,32 Cr₂O₃; 0,32 MnO; 32,3 FeO;

0,19 Co; 1,33 Ni; $Fa_{56,1}$; $SiO_2/MgO = 2,89$; $FeO/(FeO + MgO) = 0,70$.

Уламки ймовірно силікатних макрохондр або загартованих імпактних розплавів знайдено в деяких індивідуальних зразках метеорита Кримка. Кутасті уламки світло-сірого до білого кольору досить великі, розміром ≤ 1 см, мають однорідну будову. Під оптичним мікроскопом частина з них характеризується приховано-кристалічною будовою з плямистим погасанням силікатної суміші, а частина — тонкозернистою. Рентгеноструктурне дослідження силікатної речовини уламків за допомогою дифрактометричного методу показало, що прихованокристалічний агрегат складений піроксеном [1, 7].

На жаль, у нас немає прямих морфологічних доказів належності даних уламків до макрохондр, але їх однорідний мінеральний склад свідчить про диференційованість внаслідок повного переплавлення проторечовини у процесі хондротворення або імпактного плавлення на первісних тілах. Досить великі розміри уламків вказують на існування в зоні агломерації материнського тіла метеорита Кримка консолідованих первісних об'єктів (макрохондр або уламків імпактної речовини) розміром понад 1 см, що підтверджується також рідкісними знахідками макрохондр у деяких хондритах, наприклад, розміром до 4 см в хондриті *Parnalle* [13].

Уламок макрохондри в хондриті Саратов (L4) світло-сірого кольору і повнокристалічної будови виявлено у полірованому шліфі метеорита [8]. Знахідка є досить рідкісною, оскільки з 4000 відібраних під біноклем із силікатної фракції метеорита хондр нами зареєстрована лише одна макрохондра діаметром 7 мм. Розміри уламку в полірованому шліфі $5,7 \times 5$ мм, однак кривизна дугоподібного контуру і форма уламку дають підстави визначити дофрагментарні розміри як $\geq 5,7 \times 7$ мм.

Згідно з рентгеноструктурними і рентгено-спектральними даними, уламок складений клінобронзитом ($En_{77,9}Fe_{19,2}Wo_{2,9}$), склад якого слабо коливається в межах хондри і характеризується підвищеним вмістом Са порівняно з піроксеном в основній масі метеорита. Клінобронзит містить мікронні ідіоморфні зерна Fe, Ni-металу з підвищеним вмістом (мас. %) Ni (14,2), Co (0,89) і Cr (0,12), що свідчить про високотемпературні умови їх утворення та наступне швидке охолодження [8].

За морфологією і складом зерна нікелістого заліза в уламку суттєво відмінні від металу в матриці метеорита Саратов [9], характерними особливостями якого є різко виражений ксеноморфізм зерен, широкий розвиток структур ударного метаморфізму (нейманові лінії, їх деформація, пластинчаста скульптура поверхні зерен, як наслідок наявності смуг ковзання в камаситі, структури плавлення теніту в камасит-тенітових зростках) і неоднорідний склад (мас. %) зерен камаситу (5,31—6,55 Ni; 91,3 — 94,9 Fe; 0,03—0,76 Co; 0,0—0,05 Cr).

Особливості морфології уламка макрохондри, складу клінобронзиту і нікелістого заліза свідчать про високотемпературні умови її утворення. Припускається широке поширення макрохондр у доагломераційний період і їх переважне руйнування через зіткнення у процесі агломерації материнського тіла метеорита [8].

Макрохондра в хондриті "Велика Балка" (L4-5) розміром 7×6 мм, округлої форми і сірого кольору виявлена в одному з полірованих шліфів метеорита (рис. 6, а). Вона характеризується порфіровою структурою, наявністю широкої ($\leq 0,7$ мм) оболонки із великих силікатних зерен і чітким контактом з основною частиною хондрита. Мінеральний склад представлений олівіном і піроксеном з деякими акцесорними зернами нікелістого заліза, трюїлиту і хроміту.

Порфірові кристали олівіну і піроксену розміром $4 \times 0,7$ мм мають призматичну або голчасту форму, і розташовані у трьох напрямках в плагіоклазовому мезостазисі (рис. 6, б). Мезостазис містить ксеноморфні полікристалічні зерна силікатів другої генерації з ізометричними монокристалами (рис. 6, в), а також деякі скупчення субмікронних кристалів хроміту (рис. 6, д). Наявність зерен другої генерації і грубозерниста будова силікатної оболонки є свідченням метаморфічних змін у материнському тілі метеорита.

Макрохондра в хондриті Chateau-Renard (L6) розміром 10×9 мм характеризується світло-сірим кольором, чіткими краями, порфіровою будовою і наявністю чорних імпактних жилок та ділянок, заповнених ударним розплавом. Прожилки шириною 20—40 мкм звивисті, деякі з них виходять в матрицю. В ударних ділянках мезостазис вміщує мікронні амєбоподібні зерна хроміту. Макрохондра оточена тонкозернистою силікатною оболонкою.

Мінеральний склад представлений переважно силікатами — олівіном і піроксеном, меншою мірою зернами нікелістого заліза, троїлиту, які характеризуються незначними варіаціями хімічного складу, та поодинокими зернами хроміту. За даними рентгеноспектрального дослідження камасит (11 аналізів) вміщує у середньому (мас. %): 92,0 Fe; 6,46 Ni; 0,95 Co; 0,05 Cr; 0,08 S; $\leq 0,01$ P; сума — 99,6; теніт (5 аналізів) — 74,4 Fe; 23,2 Ni; 0,40 Co; 0,06 Cu; 0,08 S; $\leq 0,01$ P; сума — 98,2; троїліт (2 аналізи) — 61,2 Fe; 39,0 S; 0,12 Ni; 0,06 Co; $\leq 0,02$ Cu; сума — 100,4.

Дослідження макрохондри вказують на її ординарні для порфірових хондр структурно-мінералогічні та хімічні характеристики, однак хороша збереженість її структури в хондриті петрологічного типу 6 є досить рідкісним і не зовсім зрозумілим явищем. Особливо, якщо врахувати, що даний метеорит, згідно з попередніми дослідженнями, був інтенсивно зміненим ударним метаморфізмом [12], на що вказують також заповнені імпаکتним розплавом прожилки в макрохондрі. Так, наявність у хондриті численних імпактних прожилків ши-

риною до 200 мкм з високobarичними модифікаціями олівіну і піроксену (рінгвудит, мейджорит, вадслеїт і аренсит) дала змогу авторам визначити найвищий ударний тиск для метеорита орієнтовно 23—25 ГПа, а нагрів, що його супроводжував, ≥ 1800 °C.

Неоднозначність результатів дослідження спонукає до висновку про первісну текстурну неоднорідність хондрита з наступною неоднорідною імпактною трансформацією його мінерального і хімічного складу.

Висновки. Результати дослідження макрохондр дають підстави зробити попередні висновки: 1 — цілі або частково фрагментовані макрохондри наявні у деяких вуглистих і звичайних хондритах різних петрологічних типів; 2 — вони поширеніші у нерівноважних хондритах, ніж у рівноважних; 3 — структура макрохондр переважно порфірова; 4 — лише деякі макрохондри мають унікальні структурно-мінералогічні характеристики, а інші — типові для звичайних хондр; 5 — здебільшого макрохондри покриті силікатною оболонкою: тонкозернистою у нерівноважних і грубозернистою — у рівноважних хондритах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Семененко В.П. Допланетная история минерального вещества (генетическая минералогия обыкновенных хондритов): автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Киев, 1987. 42 с.
2. Семененко В.П., Гіріч А.Л. Два типи зерен графіту в хондриті Кримка (LL3.1). *Мінерал. зб.* 2010. № 60, вип. 2. С. 44—52.
3. Семененко В.П., Гіріч А.Л. Мінералогічні особливості та генезис унікальної макрохондри метеорита Кримка (LL3.1). *Допов. Нац. акад. наук України.* 2011. № 11. С. 107—114.
4. Семененко В.П., Гіріч А.Л., Кичань Н.В. Структурно-мінералогічна характеристика метеорита з умовною назвою "Велика Балка". *Мінерал. зб.* 2018. № 68, вип. 1. С. 146—148.
5. Семененко В.П., Гіріч А.Л., Шкурченко К.О. Походження текстурних компонентів матриці хондритів. *Зб. тез наук. конф., присвяченої 50-річчю ІГМР ім. М.П. Семененка "Здобутки і перспективи розвитку геологічної науки в Україні", 14–16 трав. 2019 р.* Київ, 2019. Т. 2. С. 242—244.
6. Семененко В.П., Гіріч А.Л., Шкурченко К.О. Унікальний метеорит Кримка. Київ: Наук. думка, 2021 (у друці).
7. Семененко В.П., Мельников В.С., Самойлович Л.Г. О метеорите Крымка. *Метеоритика.* 1978. 37. С. 93—100.
8. Семененко В.П., Шаркин О.П., Гирич А.Л. Необычные фрагменты в хондрите Саратов (L4). *Тез. докл. XXI Всес. метеорит. конф. г. Миасс 24—26 апр. 1990.* Москва: ГЕОХИ АН СССР, 1990. С. 178—179.
9. Семененко В.П., Шаркин О.П., Гирич А.Л. Высокопористые фрагменты в хондрите Саратов (L4). *Геохимия.* 1992. № 6. С. 881—892.
10. Семененко В.П., Шкурченко К.О. Особливості мінералогії мікрохондр в метеориті Кримка (LL3.1). *Зан. Укр. мінерал. тов-ва.* 2012. 9. С. 58—66. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Zumt_2012_9_7
11. Семененко В.П., Шкурченко К.О., Гіріч А.Л. Хімічна неоднорідність тонкозернистої речовини в метеориті Кримка (LL3.1). *Мінерал. журн.* 2014. 36, № 4. С. 39—49. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal>
12. Baziotis I., Asimow P.D., Hu J., Ferrière L., Ma C., Cernok A., Anand M., Topa D. High pressure minerals in the Château-Renard (L6) ordinary chondrite: implications for collisions on its parent body. *Nature. Sci. reports.* 2018. 8. Art. number 9851. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28191-6>
13. Binns R.A. An exceptionally large chondrule in the Parnallee meteorite. *Mineral. Mag.* 1967. 36, Iss. 279. P. 319—324.
14. Friedrich J.M., Weisberg M.K., Ebel D.S., Biltz A.E., Corbett B.M., Iotzov I.V., Khan W.S., Wolman M.D. Chondrule size and related physical properties: A compilation and evaluation of current data across all meteorite groups. *Chemie der Erde. Geochemistry.* 2015. 75, № 4. P. 419—443. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2014.08.003>

15. Hutchison R., Bridges J.C. A survey of large silicate objects in ordinary chondrites. *Meteoritics*. 1995. **30**, № 5. P. 523—524.
16. Olsen E., Grossman L. On the origin of isolated olivine grains in type 2 carbonaceous chondrites. *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1978. **41**, Iss. 2. P. 111—127. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(78\)90001-8](https://doi.org/10.1016/0012-821X(78)90001-8)
17. Prinz M., Weisberg M.K., Nehru C.E. Gunlock, a new type 3 ordinary chondrite with a golfball-sized chondrule. *Meteoritics*. 1988. **23**. P. 297.
18. Rubin A.E. An olivine-microchondrule-bearing clast in the Krymka meteorite. *Meteoritics*. 1989. **24**, Iss. 3. P. 191—192. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.1989.tb00961.x>
19. Semenenko V.P., Girich A.L. Two types of graphite crystals within the Krymka chondrite (LL3.1). *Meteoritics and Planet. Sci.* 2011. **46**. Suppl. P. A210.
20. Weisberg M.K., Prinz M., Nehru C.E. Macrochondrules in ordinary chondrites: Constraints on chondrule-forming processes. *Meteoritics*. 1988. **23**. P. 309—310.

Надійшла 18.03.2021

REFERENCES

1. Semenenko, V.P. (1987), *Protoplanetary history of mineral matter (genetic mineralogy of ordinary chondrites)*, Abstr. of Thesis for Doctor geol.-mineral. sci., Kyiv, 42 p. [in Russian].
2. Semenenko, V.P. and Girich, A.L. (2010), *Mineral. zb.*, No. 60, Vyp. 2. pp. 44-52 [in Ukrainian].
3. Semenenko, V.P. and Girich, A.L. (2011), *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.*, No. 11, Kyiv, pp. 107-114. [in Ukrainian]. http://nbuv.gov.ua/UJRN/dnanu_2011_11_21
4. Semenenko, V.P., Girich, A.L. and Kychan, N.V. (2018), *Mineral. zb.*, No. 68, Vyp. 1, Kyiv, pp. 146-148 [in Ukrainian].
5. Semenenko, V.P., Shkurenko, K.O. and Girich, A.L. (2019), *Zb. tez nauk. konf. do 50-richchya IGMOF M.P. Semenka NAN Ukrayiny, 14-16 travnya 2019 r.*, Vol. 2, Kyiv, UA, pp. 242-244 [in Ukrainian].
6. Semenenko, V.P., Girich, A.L. and Shkurenko, K.O. (2021), *A unique meteorite Krymka*, Nauk. dumka, Kyiv, UA, [in Ukrainian]. In print.
7. Semenenko, V.P., Melnikov, V.S. and Samoilovich, L.G. (1978), *Meteoritica*, Vol. 37, Moscow, RU, pp. 93-100 [in Russian].
8. Semenenko, V.P., Sharkin, O.P. and Girich, A.L. (1990), *Absr. of the reports XXI USSR meteor. conf., Miass, 24-26 April, 1990*, Moscow, GEOHI AS SSSR, RU, pp. 178-179 [in Russian].
9. Semenenko, V.P., Sharkin, O.P. and Girich, A.L. (1992), *Geokhimiya*, No. 6, Moscow, RU, pp. 881-892 [in Russian].
10. Semenenko, V.P. and Shkurenko, K.O. (2012), *Zap. Ukr. mineral. tov-va*, Vol. 9, Kyiv, pp. 58-66 [in Ukrainian]. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Zumt_2012_9_7
11. Semenenko, V.P., Shkurenko, K.O. and Girich, A.L. (2014), *Mineral. Journ. (Ukraine)*, Vol. 36, No. 4, Kyiv, pp. 39-49 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal>
12. Baziotis, I., Asimow, P.D., Hu, J., Ferrière, L., Ma, C., Cernok, A., Anand, M. and Topa, D. (2018), *Nature. Sci. rep.* Vol. 8, Art. number 9851. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28191-6>
13. Binns, R.A. (1967), *Mineral. Mag.*, Vol. 36, Iss. 279, pp. 319-324.
14. Friedrich, J.M., Weisberg, M.K., Ebel, D.S., Biltz, A.E., Corbett, B.M., Iotzov, I.V., Khan, W.S. and Wolman, M.D. (2015), *Chemie der Erde. Geochemistry*. Vol. 75, No. 4, pp. 419-443. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2014.08.003>
15. Hutchison, R. and Bridges, J.C. (1995), *Meteoritics*, Vol. 30, No. 5, pp. 523-524.
16. Olsen, E. and Grossman, L. (1978), *Earth and Planet. Sci. Lett.*, Vol. 41, Iss. 2, pp. 111-127. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(78\)90001-8](https://doi.org/10.1016/0012-821X(78)90001-8)
17. Prinz, M., Weisberg, M.K. and Nehru, C.E. (1988), *Meteoritics*, Vol. 23, p. 297.
18. Rubin, A.E. (1989), *Meteoritics*, Vol. 24, Iss. 3, pp. 191-192. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.1989.tb00961.x>
19. Semenenko, V.P. and Girich, A.L. (2011), *Meteoritics and Planet. Sci.*, Vol. 46, Suppl. p. A210.
20. Weisberg, M.K., Prinz, M. and Nehru, C.E. (1988), *Meteoritics*, Vol. 23, pp. 309-310.

Received 18.03.2021

V.P. Semenenko, DrSc (Geology, Mineralogy), Corresponding Member
of NAS of Ukraine, Prof., Head of Department

M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine
34, Acad. Palladin Ave., Kyiv, Ukraine, 03142

E-mail: cosmin@i.ua; <https://orcid.org/0000-0003-1479-6874>

A.L. Girich, PhD (Geology), Senior Research Fellow

M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine
34, Acad. Palladin Ave., Kyiv, Ukraine, 03142

E-mail: cosmin@i.ua; <https://orcid.org/0000-0002-0708-2753>

K.O. Shkurenko, PhD (Geology), Research Fellow

M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine
34, Acad. Palladin Ave., Kyiv, Ukraine, 03142

E-mail: cosmin@i.ua; <https://orcid.org/0000-0002-2665-5916>

N.V. Kychan, PhD (Geology), Research Fellow

M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine
34, Acad. Palladin Ave., Kyiv, Ukraine, 03142

E-mail: cosmin@i.ua; <https://orcid.org/0000-0002-6793-6538>

MACROCHONDRULES IN SOME CHONDRITES:

1. STRUCTURAL-MINERALOGICAL CHARACTERISTICS

The results of structural, mineralogical and chemical study of rare structural units of chondrites, macrochondrules and their fragments, found in five chondrites of different chemical groups and petrological types (Allende CV3, Krymka LL3.1, Saratov L4, "Velyka Balka" L4-5, Château-Renard L6), are given. Most of them are generally similar to ordinary chondrules and previously studied macrochondrules. They have a radial and porphyritic texture, consist of olivine and pyroxene, and are covered by a silicate rim, which is fine-grained in the macrochondrules of unequilibrated chondrites and coarse-grained in equilibrated ones. Only two macrochondrules among studied one's are extraordinary and indicate specific conditions for their formation in the protoplanetary nebula. The first one, separated directly from the Allende chondrite, is characterized by the presence of a thin amorphous shell with a porous structure and with unambiguous sculpture features of instantaneous melting and solidification of its surface silicate layer. The second one, studied in a polished section of the Krymka meteorite, is characterized by a zonal structure and the presence of graphite grains and possibly bitumen inclusions. According to the SiO_2/MgO ratio, its fine-grained silicate rim with rare graphite crystals and possibly bitumen inclusions corresponds to the fine-grained rims of ordinary chondrules, but is different from the carbonaceous material of meteorites.

Keywords: meteorite, chondrite, macrochondrule, texture, minerals, sculpture of surface.