

<https://doi.org/10.15407/mineraljournal.43.03.054>  
УДК 523.681

**В.П. Семененко**, д-р геол.-мін. наук, чл.-кор. НАН України, проф., зав. від.  
E-mail: [cosmin@i.ua](mailto:cosmin@i.ua); <https://orcid.org/0000-0003-1479-6874>

**А.Л. Гіріч**, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.  
E-mail: [cosmin@i.ua](mailto:cosmin@i.ua); <https://orcid.org/0000-0002-0708-2753>

**К.О. Шкуренко**, канд. геол. наук, наук. співроб.  
E-mail: [cosmin@i.ua](mailto:cosmin@i.ua); <https://orcid.org/0000-0002-2665-5916>

**Н.В. Кичань**, канд. геол. наук, наук. співроб.  
E-mail: [cosmin@i.ua](mailto:cosmin@i.ua); <https://orcid.org/0000-0002-6793-6538>

Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України  
03142, м. Київ, Україна, пр-т Акад. Палладіна, 34

## МАКРОХОНДРИ В ДЕЯКИХ ХОНДРИТАХ: 2. ГЕНЕТИЧНІ АСПЕКТИ

*За результатами електронномікроскопічних та мікрозондових досліджень макрохондр у хондритах Allende CV3, Кримка LL3.1, Саратов L4, "Велика Балка" L4-5 і Château-Repard L6 зроблено такі генетичні висновки: 1) за будовою та мінеральним складом більшість макрохондр не відрізняється від ординарних хондр, що свідчить про подібність умов їхнього утворення; 2) вперше виявлена відповідність співвідношень  $SiO_2/MgO$  і  $FeO/(FeO + MgO)$  у тонкозернистих оболонках макрохондр і хондр метеорита Кримка, яка безпосередньо вказує на їхнє співіснування в одному і тому ж пиловому довікллі протопланетної туманності; 3) унікальні характеристики вперше знайдених двох макрохондр дали змогу деталізувати умови їхнього утворення та існування в протопланетній туманності. Полізонна графітовмісна макрохондра з метеорита Кримка утворилась внаслідок акреційного росту в мінералогічно змінному пиловому довікллі. Її складна еволюційна історія охоплювала процеси переплавлення та селективного випаровування поверхневого шару макрохондри, акрецію пилу довіклля, формування тонкозернистої оболонки та міграційне вторгнення органічної проторечовини з її наступним частковим метаморфічним перетворенням у графіт. Макрохондра з оплавленою поверхнею з хондрита Allende зазнала в протопланетній туманності значного впливу високоенергетичних процесів і миттєвого охолодження; 4) рідкісність макрохондр у хондритах зумовлена, найімовірніше, не специфічними умовами їх виникнення, а пріоритетним над хондрами руйнуванням унаслідок постійного руху та взаємодії між собою та з іншими консолідованими об'єктами в доагломераційний період розвитку метеоритів.*

**Ключові слова:** метеорит, хондрит, макрохондра, генетичні аспекти, акреція, хондротворення, протопланетна туманність.

Макрохондри, тобто силікатні хондри розміром  $\geq 5$  мм [28], належать до рідкісних компонентів хондритів, які можуть бути важливим індикатором ранніх фізико-хімічних процесів у протопланетній туманності, а також джерелом грубозернистої речовини [9, 12] матриці нерівноважних хондритів. Відповідно до петрографічних досліджень 833 звичайних хондритів із метеоритної колекції Музею природознавства (*Natural History Museum*, Лондон,

Велика Британія) [20], одна макрохондра припадає в середньому на 9,5 хондритів групи LL, на 25,7 — групи L та на 55,7 — групи H. За формою, структурою та мінеральним складом діагностовані макрохондри ідентичні звичайним хондрам. Три макрохондри розміром  $> 5$  мм ексцентрично-променистої будови було знайдено у вуглистих хондритах *Gujba (CBA)*, *Acfer 139 (CR2)*, *Acfer 187 (CR2)*, а також одна унікальна макрохондра з явними ознаками злиття

Цитування: Семененко В.П., Гіріч А.Л., Шкуренко К.О., Кичань Н.В. Макрохондри в деяких хондритах: 2. Генетичні аспекти. *Мінерал. журн.* 2021. 43, № 3. С. 54—61. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.43.03.054>

пластичних хондр різної будови — у хондриті *Allende (CV3)* [29]. Розміри макрохондр у вуглистих хондритах рідкісної групи *CB* можуть досягати 1 см [27].

Згідно з сучасними уявленнями, більшість дослідників вважають, що макрохондри утворились у тій же частині протопланетної туманності та у тих же фізико-хімічних умовах, що і хондри [18, 20], але допускають дещо інші співвідношення газ/пил [14, 23, 28] або можливість виникнення макрохондр у результаті злиття кількох пластичних протохондр [29].

У попередній роботі [11] ми представили результати дослідження дев'яти макрохондр та їх уламків у п'яти хондритах (*Allende CV3*, Крим-

ка *LL3.1*, Саратов *L4*, "Велика Балка" *L4-5*, *Château-Renard L6*), головні структурно-мінералогічні характеристики яких узагальнено в таблиці та дають змогу дійти таких висновків: 1 — цілі або частково фрагментовані макрохондри виявлено в деяких вуглистих і звичайних хондритах різних петрологічних типів; 2 — вони поширеніші в нерівноважних хондритах, ніж у рівноважних; 3 — структура макрохондр ексцентрично-промениста у вуглистому хондриті та переважно порфірова у звичайних; 4 — окремі макрохондри мають унікальні структурно-мінералогічні характеристики, а інші — типові для звичайних хондр; 5 — більшість макрохондр покриті силікатною оболон-

#### Головні мінералогічні характеристики макрохондр у вивчених хондритах

#### The main mineralogical characteristics of macrochondrules in the studied chondrites

| Хондрит                        | № з/п | Форма знаходження    | Розмір, мм | Форма                        | Будова                                 | Мінеральний склад                                                                                     | Особливості оболонок                                                          | Особливості макрохондр                         |
|--------------------------------|-------|----------------------|------------|------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| <i>Allende (CV3)</i>           | 1     | Індивідуальна        | 8×8        | Куляста                      | Ексцентрично-промениста                | Силікати                                                                                              | Чорна кора плавлення                                                          | Кора плавлення                                 |
|                                | 2     | Індивідуальна        | 6×4        | Куляста                      | Ексцентрично-промениста                | Силікати                                                                                              | Силікатна приховано-кристалічна                                               |                                                |
| Кримка ( <i>LL3.1</i> )        | 1     | У полірованому шліфі | 7×4        | Овальна                      | Зональна порфірова                     | Олівін, піроксен, Са-піроксен, плагіоклаз, камасит, теніт, троїліт, графіт, самородна мідь, кремнезем | Силікатна тонкозерниста, наявність тугоплавких мінералів, графіту, бітуму (?) | Зональна будова, наявність графіту, бітуму (?) |
|                                | 2     | Те саме              | 11×9       | Округла                      | Порфірова                              | Олівін, піроксен, Fe, Ni-метал і троїліт                                                              | Силікатна тонкозерниста                                                       |                                                |
|                                | 3     | " "                  | 7,5×3,8    | Половина овалу на краю шліфа | Порфірова                              | Олівін, піроксен, плагіоклаз, камасит, теніт, троїліт, ільменіт, Са-фосфат                            | Силікатна тонкозерниста, наявність мікрохондр                                 |                                                |
|                                | 4     | " "                  | ≤10        | Кутасті уламки               | Приховано-кристалічна                  | Піроксен, олівін                                                                                      | Оболонка відсутня                                                             |                                                |
| Саратов ( <i>L4</i> )          | " "   | 2×3                  | Уламок     | Повно-кристалічна            | Клінобронзит, нікелісте залізо, хроміт | Оболонка відсутня                                                                                     |                                                                               |                                                |
| "Велика Балка" ( <i>L4-5</i> ) | " "   | " "                  | 7×6        | Округла                      | Порфірова                              | Олівін, піроксен, нікелісте залізо, троїліт, хроміт                                                   | Силікатна грубозерниста                                                       |                                                |
| <i>Château-Renard (L6)</i>     | " "   | " "                  | 10×9       | Округла                      | Порфірова                              | Олівін, піроксен, нікелісте залізо, троїліт, хроміт                                                   | Силікатна грубозерниста                                                       |                                                |

кою: тонкозернистою — у нерівноважних, і грубозернистою — у рівноважних хондритах.

Наявність макрохондр у вуглистих і звичайних хондритах різних петрологічних типів є, найімовірніше, свідченням спільності або подібності процесу хондротворення в доагломераційний період розвитку материнських тіл метеоритів. Їхня вища поширеність у нерівноважних хондритах порівняно з рівноважними, безумовно, пов'язана з кращими умовами збереженості макрохондр у метеоритах з незначним ступенем метаморфічних змін. Ці дані підтверджуються також укрупненням зерен у силікатних оболонках макрохондр рівноважних хондритів порівняно з нерівноважними. Водночас цікаво зауважити, що більшість вивчених нами і макрохондр, і класичних хондр у звичайних хондритах мають порфірову будову, а не колосникову або ексцентрично-променисту, як в інших хондритах [24, 29]. Найважливішими результатами наших досліджень є знахідка двох унікальних і генетично важливих макрохондр: з оплавленою поверхнею із вуглистого хондрита *Allende* [3] і полізональної графітовмісної із хондрита Кримка [6, 7, 26], на інтерпретації яких зупинимось детальніше.

Відомо, що скульптура поверхні хондр належить до важливих індикаторів умов існування хондр у протопланетній газопиловій туманності (первісна скульптура) та в материнському тілі метеорита (вторинна скульптура) [22]. Перша знахідка в метеоритах макрохондри з оплавленою поверхнею, на якій збереглася первісна скульптура, є прямим структурним доказом високоенергетичних процесів у протопланетній туманності. У хондриті *Allende* макрохондра I покрита чорною скляною оболонкою, яка макроскопічно дуже подібна до кори плавлення хондритів, що виникає внаслідок проходження ними атмосфери Землі. Проведені нами електронномікроскопічні дослідження показали, що оболонка складається із двох зон — внутрішньої, яка переповнена газовими включеннями, та зовнішньої, представленій плівкою скла з окремими слідами (отворами) виходу газів на поверхню макрохондри. Високий вміст газових включень в оболонці є важливою ознакою підвищеного вмісту летких компонентів у макрохондрі. Наявність дірок натягування, як рідкісної особливості, на поверхні скляної плівки макрохондри безпосередньо вказує на миттєве загартування розплаву. В результаті незначних метаморфічних змін

на вертикальних стінках пор, а також на дні дірок натягування відмічається часткова розкристалізація скляної плівки й утворення нанометричних силікатних зерен.

Отже, поверхня макрохондри має прямі ознаки різкого підвищення температури та наступного миттєвого охолодження, що може бути пов'язано, найімовірніше, з високоенергетичною подією невідомої природи, наприклад співударяннями з іншими консолідованими об'єктами. Водночас особливості скульптури поверхні чітко вказують на те, що ця подія відбулася в доагломераційний період, коли макрохондра перебувала у вільному стані, а не в материнському тілі метеорита безпосередньо в контакті з іншими консолідованими об'єктами. За скульптурою поверхні макрохондра відмінна від класичних хондр [4, 5], але має багато спільних рис [3] зі скляними сферами, брекчіями, аглютинатами та іншими частинками із місячного реголіту. Для останніх характерне значне поширення скляних бризок і кірочок, виникнення яких зумовлене ударно-метаморфічним перетворенням речовини на поверхні Місяця. На цьому етапі дослідження макрохондри важко виявити природу її скляної поверхні — чи зумовлена вона саме імпаکتними процесами, чи ні, але факт її наявності є прямим доказом миттєвого нагріву до температури плавлення силікатів з наступним загартуванням розплаву.

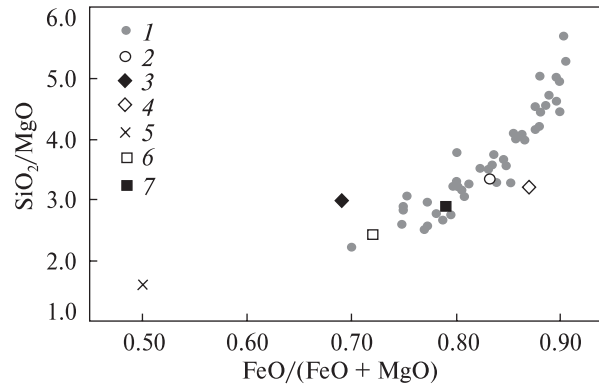
Друга дуже важлива знахідка — це полізональна макрохондра із метеорита Кримка [6, 7, 26], яка за будовою, наявністю графіту та бітуму не має аналогів серед відомих хондр і макрохондр різних хімічних груп хондритів. Неординарність макрохондри пов'язана, найімовірніше, з її складною та тривалою еволюцією. Відповідно до сучасних гіпотез, хондри є продуктом розкристалізації силікатних крапель, які утворились у результаті миттєвого переплавлення гіпотетичних пилових кульок або агрегатів акреційної природи [17, 30]. Релікти таких акреційних силікатних кульок уперше знайдено у вуглистом ксеноліті ВК13 метеорита Кримка [25]. Деякі з кульок мають полізональну будову, відповідно до якої окремі силікатні зони сильно збагачені метал-троїлітовими зернами, що вказує на їхнє утворення в результаті полістадійної акреції у мінералогічно змінному середовищі.

За аналогією з акреційними кульками, зроблено припущення [6, 7, 26] щодо належності

полізональної макрохондри до продукту переплавлення подібної за будовою силікатної протохондри, яка в доагломераційний період була покрита метал-сульфідним пилом, як мінімум, двічі. Відповідно до різко хвилястих контурів хондри, її переплавлення супроводжувалось, найімовірніше, частковим випаровуванням поверхневого шару хондри. Всередині розплавленої хондри утворились незмішувані метал-сульфід-силікатні розплави з наступним охолодженням і утворенням мантії. Швидкість охолодження була достатньо повільною для часткової або повної розкристалізації силікатів, але недостатньою для повного розділення метал-троїлітових фаз у мантіях хондри. Варто також зауважити таку текстурну особливість макрохондри як відповідність зональності її еліпсоподібній формі, що вказує на пластичний стан макрохондри під час деформації в допланетній туманності або в процесі агломерації материнського тіла хондрита.

На жаль, відсутність даних по валовому хімічному складу макрохондри не дає підстав для визначення її хімічної природи. Наявність графіту в макрохондрі свідчить про можливість його формування *in situ*, тобто із вуглецевмісної проторечовини, наприклад, органіки або ймовірніше С-збагаченого металу, що підтверджується тісною асоціацією графіту з метал-сульфідними зернами. За формою, розміром і будовою зерен, а також за характером їхньої асоціації з нікелістим залізом і троїлітом, графіт хондри відповідає графіту залізних метеоритів [21], що може бути важливою ознакою його утворення внаслідок процесів переплавлення С-вмісних зерен Fe,Ni-металу під час хондротворення.

Водночас за розміром і формою, а особливо за розташуванням на периферії макрохондри, зерна графіту подібні до включень бітуму в ксеноліті РС із хондрита Кримка [1, 8]. Ці особливості, а також додаткові електронномікроскопічні дані про аморфний або слабозкристалізований стан поодиноких вуглецевих ділянок [10], дають змогу зробити припущення про подібність міграційного механізму формування бітуму в ксеноліті РС і графіту в макрохондрі, тобто міграцію із невідомих джерел органічної проторечовини типу бітуму в ксеноліт і макрохондру з наступною його ударно-метаморфічною графітизацією. На відміну від ксеноліту РС, бітум у макрохондрі та в її тонкозернистій оболонці зазнав вищого ступеню



Співвідношення  $\text{SiO}_2/\text{MgO}$  та  $\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$  у тонкозернистих оболонках 46 хондр (1) та їхнє середнє значення (2), в оболонках уламка макрохондри (3) та полізональної макрохондри з графітом (4), за даними EDS, у метеориті Кримка загалом (5) [2], а також у прозорій (6) [19] та непрозорій (7) [19] матриці Кримки

Correlation of  $\text{SiO}_2/\text{MgO}$  vs.  $\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$  for the fine-grained rims of 46 chondrules (1) and their mean (2), for the macrochondrule fragment rim (3), for the polyzonal graphite-bearing macrochondrule rim (4) based on EDS data, for the bulk Krimka meteorite (5) [2], as well as transparent (6) [19] and opaque (7) [19] Krimka matrix

ударно-метаморфічного перетворення, що зумовило майже повну його графітизацію.

Структурно-мінералогічні та хімічні особливості тонкозернистої оболонки полізональної макрохондри з хондрита Кримка свідчать про її акреційне походження, тобто про налипання пилової компоненти газопилової протопланетної туманності на поверхню макрохондри. Цілком можливо, що частина пилу могла мати реконденсаційну природу внаслідок часткового випаровування поверхневих шарів макрохондри під час хондротворення. На відміну від макрохондри, оболонка не була переплавленою або нагрітою до високої температури та зберегла головні структурно-мінералогічні характеристики допланетного пилу [15], до яких належать мікронний та субмікронний розмір зерен, високий ступінь неоднорідності хімічного складу мінералів, наявність реліктів високотемпературних мінералів, частина з яких може мати досонячне походження.

Отже, вперше знайдені у хондритах дві унікальні макрохондри сприяють деталізації особливостей процесів первісної акреції фракціонованого на метал і силікат пилу, високотемпературного хондротворення та взаємодії хондр з пилом довкілля в протопланетній туманності.

Серед вивчених макрохондр валовий хімічний склад їхніх тонкозернистих оболонки ми

визначили лише для полізональної макрохондри з графітом та для уламка макрохондри з метеорита Кримка. Однак, співставлення цих результатів з даними по валовому хімічному складу тонкозернистих оболонок звичайних хондр цього ж метеорита дають можливість зробити деякі цікаві висновки.

За співвідношеннями  $\text{SiO}_2/\text{MgO}$  і  $\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$ , тонкозернисті оболонки полізональної макрохондри з графітом і уламка макрохондри у хондриті Кримка (рисунок) загалом подібні до аналогічних оболонок класичних хондр [13], що свідчить про їхнє співіснування у доагломераційний період в одному і тому ж пиловому середовищі. Водночас, є певні хімічні відмінності як між оболонками хондр, прозорою і непрозорою матрицею, так і між оболонками макрохондр. Останні подібні між собою та з непрозорою матрицею за співвідношенням  $\text{SiO}_2/\text{MgO}$ , але відмінні за співвідношенням  $\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$ . Оболонка полізональної макрохондри з графітом менш змінена, ніж оболонка уламка макрохондри, що є ознакою різного ступеню їхнього метаморфічного перетворення. Так, за співвідношенням  $\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$  оболонка полізональної макрохондри з графітом [6, 7, 26] характеризується вищим значенням, а відповідно і вищим ступенем примітивності, ніж непрозора матриця, яка діагностована раніше як стандарт примітивної речовини хондритів [19]. Такі особливості її валового хімічного складу, а також наявність в оболонці Ca, Al-мінералів дали змогу зробити припущення [7] щодо утворення макрохондри у збагаченій високотемпературними мінералами і віддаленій від Сонця зоні протопланетної туманності, ніж та, в якій сформувалася основна маса хондр.

Детальне вивчення макрохондр у метеоритах має також важливе значення для виявлення розміру силікатних крапель, термодинамічних умов хондроутворення та існування хондр у протопланетній туманності. Проведені дослідження викликають сумнів у наявності безпосереднього зв'язку між розповсюдженням макрохондр у метеоритах та в газопиловому середовищі протопланетної туманності. Відносно високий вміст крупних порфірових уламків і силікатних кристалів як реліктів макрохондр у матриці хондритів є одним із аргументів на користь припущення [12] щодо досить значного поширення макрохондр у період хондроутворення з наступним їхнім пріоритет-

ним над хондрами руйнуванням у результаті постійного руху та взаємодії між собою та іншими консолідованими об'єктами ще на ранніх етапах розвитку протопланетної туманності. Так, попередні дослідження показали [16], що під час зіткнення зі швидкістю  $\sim 1$  км/с саме більші за розміром зерна руйнуються вщент. Ці дані цілком узгоджуються з нашими спостереженнями, що космічні зерна мінералів, на відміну від земних, характеризуються підвищеною крихкістю через наявність в них дефектів, зумовлених, найімовірніше, космічним опроміненням.

**Висновки.** Результати дослідження макрохондр у п'яти хондритах узгоджуються з літературними даними про те, що: а) макрохондри є рідкісним, але звичайним компонентом хондритів незалежно від їхньої хімічної групи та петрологічного типу; б) більшість макрохондр за будовою та мінеральним складом не відрізняється від ординарних хондр, що свідчить про подібність умов хондроутворення в одній і тій же області протопланетної туманності. Цей важливий генетичний висновок підтверджується будовою вивчених нами макрохондр, а також структурно-мінералогічними та хімічними особливостями їхніх тонкозернистих оболонок. Однак, якщо не враховувати макрохондри у вуглистом хондриті *Allende*, на відміну від попередніх досліджень, нами виявлено явне домінування в макрохондрах, як і в хондрах звичайних хондритів, порфірових, а не колосникових або ексцентрично-променистих структур, що також є додатковим аргументом на користь їхнього утворення в спільному з хондрами газопиловому резервуарі. А повна відповідність співвідношень  $\text{SiO}_2/\text{MgO}$  і  $\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$  у тонкозернистих оболонках макрохондр і хондр у метеориті Кримка, безпосередньо вказує на їхнє співіснування в одній і тій самій області протопланетної туманності в доагломераційний період розвитку материнського тіла метеорита.

Знахідка та вивчення двох унікальних макрохондр є найважливішим результатом цієї роботи. Особливості поверхні макрохондри 1 з хондрита *Allende* свідчать про значний вплив високоенергетичних процесів на консолідовану речовину протопланетної туманності, а особливості будови та мінерального складу полізональної макрохондри з метеорита Кримка — про акреційний ріст її протохондри у мінералогічно змінному пиловому доквіллі з на-

ступною складною еволюційною історією, яка охоплювала процеси переплавлення та селективного випаровування поверхневого шару макрохондри, акрецію пилу доквілля, формування тонкозернистої оболонки та міграційне вторгнення органічної проторечовини з її наступним частковим метаморфічним перетворенням у графіт.

Рідкісність макрохондр у хондритах зумовлена, найімовірніше, не специфічними умовами їхнього утворення та відповідно малопоширеністю в допланетній туманності, а з їхнім

пріоритетним над хондрами руйнуванням у результаті постійного руху і взаємодії між собою та з іншими консолідованими об'єктами ще на ранніх етапах розвитку протопланетної туманності. Враховуючи підвищену крихкість космічних зерен мінералів порівняно з земними аналогами, а також наявність значної кількості продуктів дроблення хондр у матриці нерівноважних хондритів, ми впевнені, що саме макрохондри є джерелом крупнозернистої компоненти (уламків хондр та окремих їхніх складових) нерівноважних хондритів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Гіріч А.Л., Семененко В.П. Порфіровий бітумовмісний ксеноліт у хондриті Кримка (LL3.1): 1. Структурно-мінералогічна характеристика. *Мінерал. журн.* 2016. **38**, № 2. С. 56–66. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.38.03.056>
2. Дьяконова М.И., Харитонов В.Я. Результаты химического анализа некоторых каменных и железных метеоритов коллекции АН СССР. *Метеоритика*. 1960. Вып. 18. С. 48–67.
3. Семененко В.П. Допланетная история минерального вещества (генетическая минералогия обыкновенных хондритов): автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Киев, 1987. 42 с.
4. Семененко В.П., Гіріч А.Л. Хондрит Саратов (L4): I. Скульптура поверхности хондр и некоторые особенности их минералогии. *Мінерал. журн.* 1998. **20**, № 2. С. 19–33.
5. Семененко В.П., Гіріч А.Л. Хондрит Саратов (L4): II. Природа скульптуры поверхности хондр. *Мінерал. журн.* 1998. **20**, № 3. С. 13–21.
6. 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.
7. Семененко В.П., Гіріч А.Л. Два типи зерен графіту в хондриті Кримка (LL3.1). *Мінерал. зб.* 2010. № 60, вип. 2. С. 44–52.
8. Семененко В.П., Гіріч А.Л. Порфіровий бітумовмісний ксеноліт у хондриті Кримка (LL3.1): 2. Будова, хімічний склад та походження бітуму. *Мінерал. журн.* 2016. **38**, № 4. С. 23–31. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.38.04.023>
9. Семененко В.П., Гіріч А.Л., Шкуренко 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.
10. Семененко В.П., Гіріч А.Л., Шкуренко К.О. Унікальний метеорит Кримка. Київ: Наук. думка, 2021 (у друці).
11. 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>
12. Семененко В.П., Шаркин О.П., Гіріч А.Л. Необычные фрагменты в хондрите Саратов (L4). *Тез. докл. XXI Всесоюз. метеорит. конф. г. Миасс 24–26 апр. 1990*. Москва: ГЕОХИ АН СССР, 1990. С. 178–179.
13. Семененко В.П., Шкуренко 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>
14. Binns R.A. An exceptionally large chondrule in the Parnallee meteorit. *Mineral. Mag.* 1967. **36**, Iss. 279. P. 319–324.
15. Brearley A.J. Nature of matrix in unequilibrated chondrites and its possible relationship to chondrules. *Chondrules and the Protoplanetary Disk*. 1996. P. 137–151.
16. Cassen P., Boss A.P. Protostellar collapse, dust grains and solar-system formation. *Meteorites and the early solar system* (A89-27476 10-91). Tucson, AZ, Univ. of Arizona Press, 1988. P. 304–328.
17. Clayton D.D. Chemical and isotopic fractionation by grain size separates. *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1980. **47**, Iss. 2. P. 199–210. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(80\)90036-9](https://doi.org/10.1016/0012-821X(80)90036-9)
18. 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>
19. 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**, Iss. 1. P. 33–51. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(81\)-90262-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(81)-90262-3)
20. Hutchison R., Bridges J.C. A survey of large silicate objects in ordinary chondrites. *Meteoritics*. 1995. **30**, № 5. P. 523–524.
21. Mason B. *Meteorites*. New York, London: John Wiley and Sons Incorporation, 1963. 306 p.

22. Michel-Levi M.C. SEM-observation of H-group hondrites. *Meteoritics*. 1977. **12**, № 3. P. 194.
23. 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.
24. Ruzicka, A., Snyder, G.A., Taylor, L.A. Mega-chondrules and large, igneous-textured clasts in Julesberg (L3) and other ordinary chondrites: Vapor-fractionation, shock-melting and chondrule formation. *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 1998. **62**, Iss. 8. P. 1419–1442. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(98\)00029-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(98)00029-5)
25. 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. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2001.tb01945.x>
26. 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.
27. Weisberg M.K., Prinz M., Clayton R.N., Mayeda T.K., Sugiura N., Zashu S., Ebihara M. A new metalrich chondrite grouplet. *Meteoritics and Planet. Sci.* 2001. **36**. P. 401–418. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2001.tb01882.x>
28. Weisberg M.K., Prinz M., Nehru C.E. Macrochondrules in ordinary chondrites: Constraints on chondrule-forming processes. *Meteoritics*. 1988. **23**. P. 309–310.
29. Weyrauch M., Bischoff A. Macrochondrules in chondrites-formation by melting of mega-sized dust aggregates and/or by rapid collisions at high temperatures? *Meteoritics and Planet. Sci.* 2012. **47**, Iss. 12. P. 2237–2250. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2012.01403.x>
30. Wood J.A. On the formation of meteoritic chondrules by aerodynamic drag heating in the solar nebular. *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1984. **70**, Iss. 1. P. 11–26. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(84\)90205-X](https://doi.org/10.1016/0012-821X(84)90205-X)

Надійшла 20.04.2021

#### REFERENCES

1. Girich, A.L. and Semenenko, V.P. (2016), *Mineral. Journ. (Ukraine)*, Vol. 38, No. 3, Kyiv, pp. 56-66 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.38.03.056> [in Ukrainian].
2. Dyakonova, M.I. and Charitonova, V.Y. (1960), *Meteoritica*, Vyp. 18, Moscow, pp. 48-67 [in Russian].
3. 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].
4. Semenenko, V.P. and Girich, A.L. (1998), *Mineral. Journ. (Ukraine)*, Vol. 20, No. 2, pp. 19-33 [in Russian].
5. Semenenko, V.P. and Girich, A.L. (1998), *Mineral. Journ. (Ukraine)*, Vol. 20, No. 3, pp. 13-21 [in Russian].
6. 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](http://nbuv.gov.ua/UJRN/dnanu_2011_11_21)
7. Semenenko, V.P. and Girich, A.L. (2010), *Mineral. zb.*, No. 60, Vyp. 2, pp. 44-52 [in Ukrainian].
8. Semenenko, V.P. and Girich, A.L. (2016), *Mineral. Journ. (Ukraine)*, Vol. 38, No. 4, Kyiv, pp. 23-31 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.38.04.023>
9. Semenenko, V.P., Shkurenko, K.O. and Girich, A.L. (2019), *Zb. tez nauk. konf. do 50-richchya IGMOF M.P. Semenenka NAN Ukrayiny, 14-16 travnya 2019 r.*, Vol. 2, Kyiv, UA, pp. 242-244 [in Ukrainian].
10. Semenenko, V.P., Girich, A.L. and Shkurenko, K.O. (2021), *A unique meteorite Krymka*, Nauk. dumka, Kyiv, UA [in Ukrainian] (in print).
11. Semenenko, V.P., Girich, A.L., Shkurenko, K.O. and Kychan, N.V. (2021), Vol. 43, No. 2, Kyiv, pp. 29-39 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.43.02.029>
12. 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].
13. Semenenko, V.P., Shkurenko, K.O. and Girich, A.L. (2014), *Mineral. Journ. (Ukraine)*, Vol. 36, No. 4, pp. 39-49 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal>
14. Binns, R.A. (1967), *Mineral. Mag.*, Vol. 36, Iss. 279, pp. 319-324.
15. Brearley, A.J. (1996), *Chondrules and the Protoplanetary Disk*, pp. 137-151.
16. Cassen, P. and Boss, A.P. (1988), *Meteorites and the early solar system* (A89-27476 10-91), Univ. of Arizona Press, Tucson, AZ, pp. 304-328.
17. Clayton, D.D. (1980), *Earth and Planet. Sci. Lett.*, Vol. 47, Iss. 2, pp. 199-210. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(80\)90036-9](https://doi.org/10.1016/0012-821X(80)90036-9)
18. 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.
19. Huss, G.R., Keil, K. and Taylor, G.J. (1981), *Geochim. et Cosmochim. acta*, Vol. 45, Iss. 1, pp. 33-51. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(81\)90262-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(81)90262-3)
20. Hutchison, R. and Bridges, J.C. (1995), *Meteoritics*, Vol. 30, No. 5, pp. 523-524.
21. Mason, B. (1963), *Meteorites*, New York, London: John Wiley and Sons Incorporation, 306 p.
22. Michel-Levi, M.C. (1977), *Meteoritics*, Vol. 12, No. 3, p. 194.
23. Prinz, M., Weisberg, M.K. and Nehru, C.E. (1988), *Meteoritics*, Vol. 23, p. 297.
24. Ruzicka, A., Snyder, G.A. and Taylor, L.A. (1998), *Geochim. et Cosmochim. acta*, Vol. 62, Iss. 8, pp. 1419-1442. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(98\)00029-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(98)00029-5)

25. Semenenko, V.P., Bischoff, A., Weber, I., Perron, C. and Girich, A.L. (2001), *Meteoritics and Planet. Sci.*, Vol. 36, pp. 1067-1085. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2001.tb01945.x>
26. Semenenko, V.P. and Girich, A.L. (2011), *Meteoritics and Planet. Sci.*, Vol. 46, Suppl. pp. A210.
27. Weisberg, M.K., Prinz, M., Clayton, R.N., Mayeda, T.K., Sugiura, N., Zashu, S. and Ebihara, M.A. (2001), *Meteoritics and Planet. Sci.*, Vol. 36, pp. 401-418. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2001.tb01882.x>
28. Weisberg, M.K., Prinz, M. and Nehru, C.E. (1988), *Meteoritics*, Vol. 23, pp. 309-310.
29. Weyrauch, M. and Bischoff, A. (2012), *Meteoritics and Planet. Sci.*, Vol. 47, Iss. 12, pp. 2237-2250. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2012.01403.x>
30. Wood, J.A. (1984), *Earth and Planet. Sci. Lett.*, Vol. 70, Iss. 1, pp. 11-26. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(84\)-90205-X](https://doi.org/10.1016/0012-821X(84)-90205-X)

Received 20.04.2021

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

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

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

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

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

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

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

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

M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine

34, Acad. Palladin Ave., Kyiv, Ukraine, 03142

#### MACROCHONDRULES IN SOME CHONDRITES: 2. GENETIC ASPECTS

An electron microscopic and microprobe study of the macrochondrules from the chondrites Allende CV3, Krynka LL3.1, Saratov L4, "Velyka Balka" L4-5 and Château-Renard L6 allow to clear some aspects of their formation. The main of them are following: 1) The texture and mineral composition of the majority of the macrochondrules does not differ from those of ordinary chondrules, thus indicating a similarity in formation conditions, 2) It is shown for the first time that the  $\text{SiO}_2/\text{MgO}$  and  $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$  ratios of the fine-grained rims of the macrochondrules and one's of chondrules in the Krynka meteorite are well correlated. This indicates to their coexistence in the same dusty environment of the protoplanetary nebula, 3) The unique characteristics of the two firstly found macrochondrules allowed us to detail conditions of their formation and existence in the protoplanetary nebula. A polyzonal graphite-bearing macrochondrule from the Krynka meteorite formed by accretional growth in a mineralogically variable dusty environment. Its complex evolutionary history involved remelting and selective evaporation of the macrochondrule surface layer, accretion of an environmental dust, late formation of a fine-grained rim and migratory intrusion of an organic protomaterial and finally a metamorphic event that produced graphite. The melted surface of a macrochondrule from the Allende chondrite was notably affected by high-energy processes and instantaneous cooling in the protoplanetary nebula, 4) The rarity of macrochondrules in chondrites compared to typical chondrules is probably related to their priority destruction. This was caused by permanent movement and collision between them and other solid objects in the pre-agglomeration period of meteorite development.

**Keywords:** meteorite, chondrite, macrochondrule, genetic aspects, accretion, chondrule formation, protoplanetary nebula.