

УДК 523.681

МІНЕРАЛОГІЯ ТОНКОЗЕРНИСТОЇ РЕЧОВИНИ ОБОЛОНОК ХОНДР З МЕТЕОРИТА *КРИМКА* (LL3.1)

К. Шкуренко, В. Семененко

*Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення імені М. П. Семененка НАН України,
просп. акад. Палладіна, 34, 03680 м. Київ, Україна
E-mail: cosmin@i.ua*

Наведено результати структурно-мінералогічних та хімічних досліджень тонкозернистих оболонок хондр метеорита *Кримка* (LL3.1). Валовий хімічний склад тонкозернистих оболонок коливається в широких межах і, згідно зі вмістом основних компонентів, відповідає нормативному олівіну Fa_{63-83} . Відповідно до співвідношення SiO_2/MgO , більшість оболонок збагачена SiO_2 , що свідчить про їхнє формування в пиловому середовищі, збідненому тугоплавкими елементами. Деякі оболонки подібні до оболонок вуглистих ксенолітів K1, K3 і темної матриці хондрита *Кримка* й, імовірно, належать до реліктів первісного пилу. Результати досліджень свідчать про активні процеси взаємодії між низько- та високотемпературними компонентами в період акреції материнського тіла метеорита в хімічно та мінералогічно неоднорідному газопиловому середовищі протопланетної туманності.

Ключові слова: метеорит, хондрит, оболонка хондри, тонкозерниста речовина, мікрохондра.

Згідно з сучасними даними космохімії та мінералогії, одним із найцікавіших об'єктів дослідження є тонкозерниста силікатна речовина примітивних метеоритів, яку діагностують як релікт пилової компоненти протопланетної туманності [1]. Вона утворилась унаслідок акреції пилу на консолідовані об'єкти під час агломерації материнських тіл і збереглася лише в кількох десятках нерівноважних звичайних та вуглистих хондритів із 23 тисяч відомих на Землі метеоритів.

Тонкозерниста речовина – дуже складний об'єкт дослідження, оскільки вивчення її перебуває на або поза межами інструментальних можливостей. Макроскопічно вона представлена в метеоритах міліметровими за розміром ділянками чорного кольору, однорідної будови та високої щільності [1]. Детальне її вивчення можливе лише за допомогою електронного мікроскопа. Наприклад, електронно-мікроскопічне дослідження дало змогу з'ясувати, що тонкозерниста силікатна речовина є у трьох окремих текстурних одиницях нерівноважних хондритів: у матриці, ксенолітах та оболонках хондр, ксенолітів і великих зерен [1, 4–6, 10]. Відповідно до розміру зерен вона представлена трьома основними компонентами: прихованокристалічною речовиною ($\ll 1$ мкм), тонкими (< 5 мкм) і великими (> 5 мкм) зернами та їхніми уламками [10]. Структурно-мінералогічні й хімічні особливості тонкозернистої речовини в кожній текстурній одиниці дещо відрізняються, однак загалом вона складена зернами олівіну, низькокальцієвого піроксену, аморфного фельдшпатоїду та окремими зернами нікелістого заліза, троїліту, інколи магнетиту й гематиту [3, 11].

Об'єкт і методи дослідження. У найбільш відомому і генетично важливому українському хондриті *Кримка* (LL3.1) тонкозернисту речовину діагностовано в усіх трьох текстурних одиницях (рис. 1, 2), проте ми наведемо результати структурно-мінералогічних і хімічних досліджень лише тонкозернистої речовини оболонок хондр.

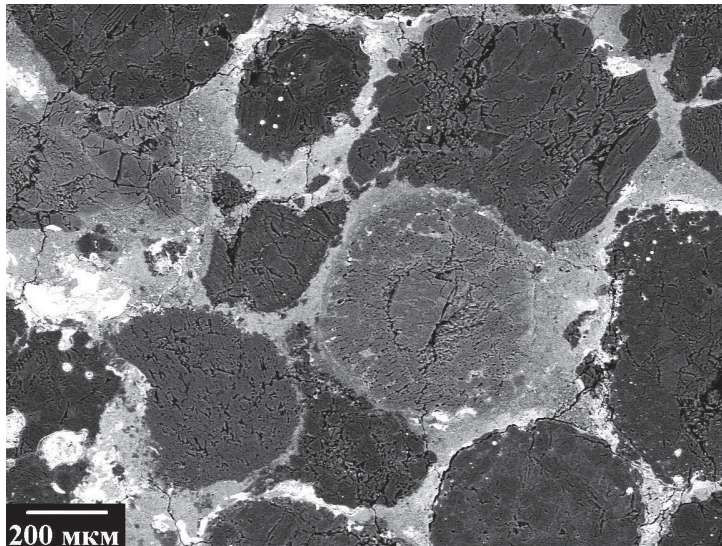


Рис. 1. Сканувальне електронно-мікроскопічне (СЕМ) зображення у відбитих електронах типової хондритової текстури метеорита *Кримка* (LL3.1). Матриця метеорита представлена тонкозернистою речовиною (ясно-сіра), збагачена FeO і вміщує хондри та їхні уламки.

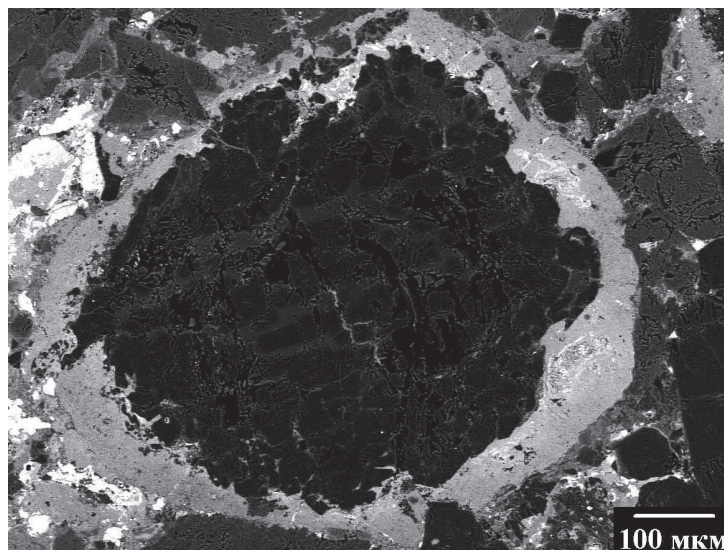


Рис. 2. СЕМ-зображення горбистої хондри мікропорфірової будови з тонкозернистою силікатною оболонкою (ясно-сіре).

Під бінокулярном МБС-2 та рудним мікроскопом ПОЛІАМ Р-312 у двох полірованих шліфах загальною площею $5,6 \text{ см}^2$ попередньо діагностовано 37 хондр із тонкозернистими силікатними оболонками. Детальні структурно-мінералогічні дослідження проводили на сканувальному електронному мікроскопі (СЕМ) марки JEOL JSM-6490LV у відбитих і вторинних електронах. Хімічні аналізи виконували за допомогою енергодисперсійного спектрометра Penta FETx3 Oxford Instruments, яким обладнаний СЕМ, в Інституті геохімії навколишнього середовища НАН України та мікроаналізатора JEOL JXA-8200 в Технічному центрі НАН України. Енергодисперсійні дослідження (EDS) проводили в окремих точках діаметром 3 мкм для визначення хімічного складу зерен мінералів і ділянках розміром 8×8 мкм для визначення валового хімічного складу тонкозернистої речовини оболонок. Еталоном для хімічних аналізів був Со. Для контролю точності EDS-даних паралельно проводили додаткові дослідження на електронному мікроаналізаторі (ЕМР) в окремих точках мінералів за прискорювальної напруги 15 кВ, сили струму 10 нА та з використанням ZAF поправок. Діаметр зонда в разі визначення хімічного складу великих зерен становив 3 мкм, а валового хімічного складу тонкозернистої речовини – 10 мкм. У всіх 37 оболонках хондр визначено валовий хімічний склад енергодисперсійним методом, а в семи з них – електронно-мікрозондовим.

Усі електронно-мікроскопічні зображення, наведені у статті, виконано у відбитих електронах.

Будова та мінеральний склад хондр. Переважна більшість вивчених хондр, які оточені тонкозернистими оболонками (див. рис. 2), мають розмір від 0,1 до 1,0 мм, мікропорфірову, меншою мірою колосникову і в єдиному випадку повнокристалічну будову, гладеньку або горбисту поверхню і, зазвичай, піроксен-олівіновий склад. Наприклад, дев'ять з 37 хондр мають горбисту поверхню, яка в шліфах виявляється у хвилястих (див. рис. 2), часто кутастих краях. Цікавою особливістю поверхні таких хондр є наявність у заглибленнях збагаченої залізом, зокрема сульфідами заліза, силікатної тонкозернистої речовини зі світлим відтінком у відбитих електронах.

Мінеральний склад хондр досить обмежений. До найпоширеніших мінералів належать збіднений Са високомагнезійний піроксен Fs_{1-25} та олівін Fa_{1-54} . Піроксен наявний у 35 хондрах, причому в 29 хондрах він представлений енстатитом, його немає лише в двох хондрах, які складені олівіном або олівіном і плагіоклазом. У поодиноких випадках піроксен уміщує понад 20 мол. % Fs. Олівін діагностовано у 28 хондрах, у 20 з яких він представлений високомагнезійними відмінами Fa_{1-9} . В окремих випадках вміст фаялітового компонента підвищується до 30 мол. %, а на контакті з тонкозернистою речовиною оболонок – до 40 мол. %. Загалом для периферії хондр характерний більш високозалістий склад силікатів, ніж у їхній серцевині. Для чотирьох з 37 хондр хімічний склад великих зерен олівіну та збідненого Са піроксену отримано за допомогою ЕМР, що в переважній більшості аналізів добре корелює з EDS-даними. Збагачений Са піроксен $\text{En}_{40-88}\text{Wo}_{10-45}\text{Fs}_{1-30}$ та плагіоклазовий мезостазис $\text{Ab}_{36-85}\text{An}_{10-64}\text{Or}_{0-5}$ є акцесорними компонентами на периферії хондр і другорядними в центральних частинах. Майже в кожній хондрі зафіксовано окремі зерна й кульки сульфідів заліза та нікелістого заліза (камасит і теніт). Металеві кульки, зазвичай, мають зональну будову – тенітове ядро з камаситовою оболонкою.

Особливості мінерального та хімічного складу тонкозернистих оболонок хондр. У полірованих шліфах під бінокулярном і рудним мікроскопом тонкозернисті оболонки непрозорі, мають чорний колір, який у звітних ділянках змінюється темно-

коричневим або бурим. Межі оболонок, особливо внутрішні, чіткі, хоча на сильно окисненій частині хондри вони можуть бути слабо помітними. Ширина оболонок змінюється від хондри до хондри і в середньому становить від перших десятків до перших сотень мікрометрів. Оболонки за будовою прихованокристалічні й однорідні. Вони містять більші зерна силікатів, сульфідів заліза і нікелістого заліза. За великих збільшень простежується слабка шаруватість, яка виявляється в різному ступені окиснення концентричних прошарків оболонок хондр. У відбитому світлі рудного мікроскопа всі оболонки ясніші, ніж тонкозерниста речовина матриці, що може свідчити або про вищу концентрацію дрібних зерен металу та/або сульфідів у них, або про вищий вміст FeO в силікатах. Виявлені під час оптично-мікроскопічного вивчення особливості оболонок хондр – чіткі внутрішні межі, мультишаруватість, тонкозернистість речовини та збагачення залізом – підтверджені електронно-мікроскопічними й хімічними дослідженнями, а також узгоджуються з літературними даними [4, 8, 10].

Згідно з електронно-мікроскопічними даними, тонкозернисті оболонки вивчених хондр представлені прихованокристалічною силікатною речовиною, переважними тонкими й окремими великими зернами олівину, піроксенів, другорядними – сульфідів заліза, нікелістого заліза й акцесорними зернами плагіоклазів, хроміту і Са-фосфатів.

Прихованокристалічна речовина складена зернами субмікронного й нанометричного розміру і є основою, у яку занурені тонкі й великі силікатні зерна (рис. 3). Разом з тонкими зернами вона утворює пористу, збагачену залізом і неоднорідну за хімічним складом мінералів силікатну суміш. Згідно з EDS-даними, валовий хімічний склад цієї суміші (середнє за 485 аналізами) такий, мас. %: FeO – 47,4; SiO₂ – 34,7; MgO – 10,4; Al₂O₃ – 2,43; NiO – 1,15; SO₃ – 1,08; CaO – 0,99; Na₂O – 0,69; MnO – 0,41; CoO – 0,28; Cr₂O₃ – 0,22; K₂O – 0,13; P₂O₅ – 0,10; TiO₂ – 0,05; V₂O₅ – 0,03. Співвідношення SiO₂/MgO варіює в межах 2,54–5,29 (середнє – 3,51), а FeO/(FeO+MgO) – 0,75–0,90 (середнє – 0,82). Перерахунок валового хімічного складу засвідчує, що тонкозерниста речовина оболонок складена в середньому нормативним високозалістим олівіном Fa_{72,2} та окремими ділянками нормативного піроксену. За даними EMP, аналітична сума валового складу (середнє за 113 аналізами в семи оболонках) цієї суміші становить 86–99 % через її пористість та, імовірно, наявність органічних сполук. Співвідношення SiO₂/MgO (2,74–4,40, середнє – 3,59) і FeO/(FeO+MgO) (0,77–0,90, середнє – 0,85) є в межах EDS-даних.

Великі зерна та їхні уламки (див. рис. 3) розподілені у тонкозернистій речовині неоднорідно. Вони представлені головно ксеноморфними та гіпідіоморфними силікатними і значно меншою мірою сульфідними, металевими зернами. Також зафіксовано великі ідіоморфні зерна олівину й піроксену (рис. 4).

Головний мінерал оболонок – олівін – утворює тонкі Fa_{9–88} і великі Fa_{1–96} зерна, мікрохондри (Fa_{8–88}), оболонки навколо піроксенових зерен та мікрохондр і тонкі (≤ 1 мкм) високозалісті пластинки (рис. 5). У поодиноких випадках наявні структури наростання голчастих зерен олівину на великі високомагнезіальні зерна піроксену. Характерною особливістю олівину є зональна будова, яка зумовлена збагаченням периферії зерен кислом заліза. Окремі великі зерна належать до уламків зональних кристалів.

Серед піроксенів найбільше поширеним є збіднений Са піроксен. Він зафіксований у вигляді тонких Fs_{10–37} та великих Fs_{1–36} зерен, у яких є домішки CaO, Al₂O₃, Cr₂O₃ та MnO.

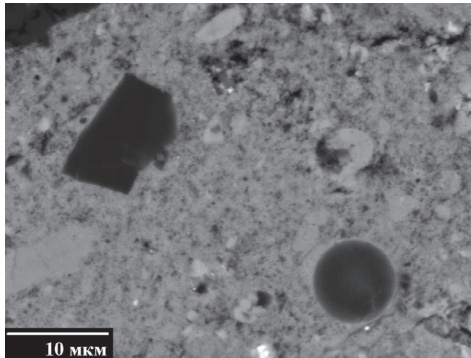


Рис. 3. СЕМ-зображення уламка великого зерна піроксену та мікрохондри в тонкозернистій силікатній речовині оболонки однієї з хондр.

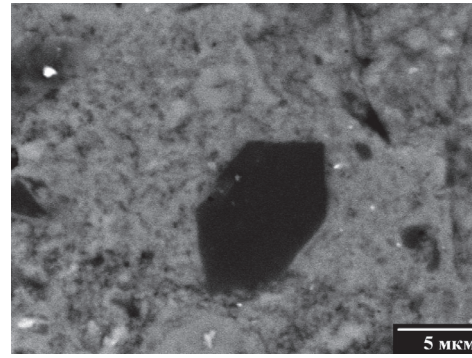


Рис. 4. СЕМ-зображення ідіоморфного зерна збідненого кальцієм високомагнезійного піроксену, розташованого в тонкозернистій силікатній речовині оболонки.

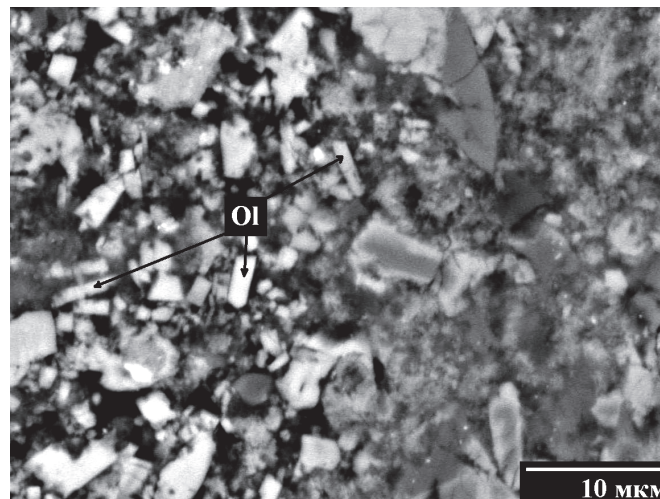


Рис. 5. СЕМ-зображення скупчення тонких уламкових пластинок високозалізного олівіну в тонкозернистій речовині оболонки однієї з хондр.

На відміну від олівіну, зерна піроксену мають однорідні хімічний склад і, відповідно, будову (див. рис. 3, 4). Піроксен належить до високотемпературної фази тонкозернистих оболонок. Простежується у вигляді дрібних зерен складу $\text{En}_{29-67}\text{Wo}_{13-39}\text{Fs}_{4-39}$, інколи великих складу $\text{En}_{18-85}\text{Wo}_{11-51}\text{Fs}_{2-45}$. Збагачений Ca піроксен асоціює з олівіном та плагіоклазом. У деяких випадках виявлено силікатні уламки зі скелетними кристалам піроксену і плагіоклазовим мезостазисом (рис. 6). За даними хімічного аналізу Ca-піроксену, вміст CaO у тонких зернах коливається від 6,26 до 17,2 мас. %, у великих – від 5,11 до 23,7 мас. %, а вміст Al_2O_3 , відповідно, – до 6,22 та 7,33 мас. %.

Сульфід заліза, камасит і меншою мірою теніт є другорядними фазами. Тісна асоціація металу з сульфідами заліза свідчить, найімовірніше, про утворення сульфідів заліза внаслідок сульфідизації камаситу.

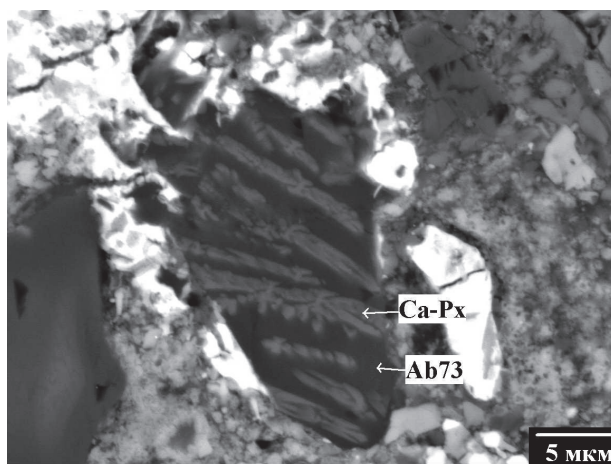


Рис. 6. СЕМ-зображення силікатного уламка хондри, представленого тонкими скелетними кристалами збагаченого кальцієм піроксену та плагіоклазовим мезостазисом.

Хімічний склад великих зерен троїліту, за даними EDS (середнє за трьома аналізами), такий, мас. %: Fe – 62,4; S – 36,0; Ni – 0,38; Co – 0,14; Cr – 0,55; P – 0,50, камаситу (середнє за сімома аналізами): Fe – 93,2; Ni – 4,68; Co – 1,96; Cr – 0,06; S – 0,13, а теніту (середнє за десятима аналізами): Fe – 49,7; Ni – 48,6; Co – 0,41; Cr – 0,98; P – 0,26; S – 0,10. Плагіоклаз виявлений у вигляді тонких зерен складу $Ab_{94}Or_3An_2$ і великих складу $Ab_{7-95}An_{1-93}Or_{0-10}$. Тонкі зерна плагіоклазу ідіоморфні, утворюють пластинки, а великі – гіпідіоморфні. За даними хімічного аналізу, великі зерна плагіоклазу представлені кислими (альбіт, олігоклаз) та основними (бітовніт, анортит) різновидами.

Хроміт – типовий акцесорний мінерал тонкозернистих оболонок. Він наявний у вигляді ксеноморфних та ідіоморфних зерен розміром ≤ 10 мкм, хімічний склад яких, за даними EDS (середнє за чотирма аналізами), такий, мас. %: Cr_2O_3 – 50,9; FeO – 40,7; NiO – 1,49; CoO – 0,10; MgO – 2,95; Al_2O_3 – 2,40; TiO – 0,94; V_2O_5 – 0,51.

Кальцій-фосфат діагностують у тонких та великих (до 10 мкм) ксеноморфних зернах в асоціації з олівіном, інколи – сульфідами. Згідно з EDS-даними, у його хімічному складі наявні 51,4 мас. % CaO та 48,6 мас. % P_2O_5 (середнє за трьома аналізами).

Одним із цікавих акцесорних компонентів оболонок є мікрохондри (див. рис. 3, 7). Результати детального вивчення мікрохондр наведені у праці [2], що дає підстави розглянути їх поверхнево. У вивчених оболонках хондр діагностовано 618 мікрохондр. Їхній переважний розмір коливається в межах 1–5 мкм, проте інколи досягає 20 мкм.

Найпоширеніші серед них збіднені Ca низькозалістисті піроксенові (див. рис. 3), високозалістисті олівінові (див. рис. 7) та порфірові піроксен-олівінові мікрохондри, а рідкісні – збіднені Ca піроксен-плагіоклазові, силікатно-сульфідні, збагачені Ca піроксен-олівінові, олівін-Ca-фосфатні, збагачені Ca піроксен-плагіоклазові й олівін-плагіоклазові мікрохондри. В окремих випадках зафіксовано структури злипання двох мікрохондр, які деформують одна одну.

Як рідкісний випадок в оболонках двох хондр знайдено структури налипання збіднених Ca піроксен-олівінових, менше – олівінових (рис. 8) і збагачених Ca піроксенових мікрохондр на поверхню хондр.

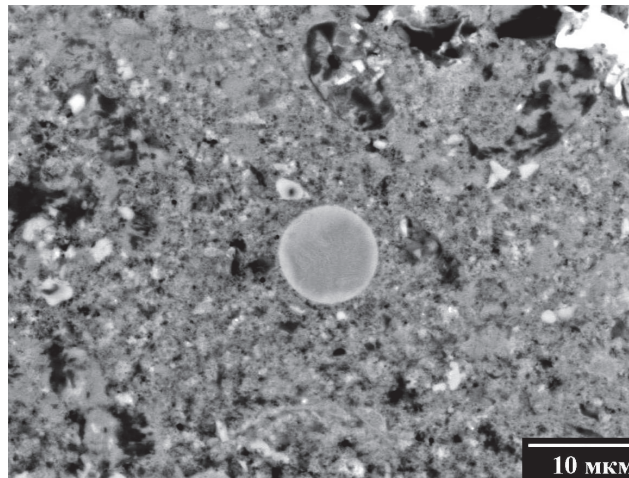


Рис. 7. СЕМ-зображення високозалізістої олівінової зональної мікрохондри, периферія якої незначно збагачена FeO.

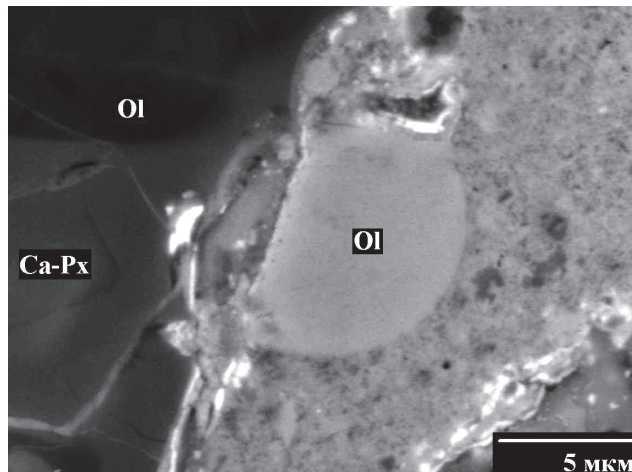


Рис. 8. СЕМ-зображення тонкозернистої силікатної оболонки, у якій високозалізіста олівінова Fa_{61} мікрохондра налипла на поверхню горбистої хондри збагаченого кальцієм піроксенового $En_{51}Wo_{48}Fs_1$ та високомагнезійного олівінового Fa_1 складу.

Походження тонкозернистої речовини оболонок хондр. Проведені дослідження засвідчили, що валовий хімічний склад тонкозернистої речовини оболонок 37 хондр метеорита *Кримка* коливається в досить широких межах. За вмістом основних компонентів – MgO (6,25–14,00 мас. %), FeO (38,9–55,0) та SiO₂ (26,5–39,1 мас. %) – він відповідає нормативному олівіну (Fa_{63-83}). За співвідношенням SiO₂/MgO (див. таблицю) окремі оболонки аналогічні до оболонок вуглистих ксенолітів K1, K3 і темної (примітивної) матриці хондрита *Кримка*. Водночас більшість із них суттєво збагачена SiO₂, що можна пояснити формуванням оболонок у пиловому середовищі, збідненому тугоплавкими компонентами.

Співвідношення SiO_2/MgO та $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$ у тонкозернистих оболонках хондр, ксенолітів і в темній матриці метеорита *Кримка*

Об'єкт		SiO_2/MgO	$\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$
Оболонка	хондр (37)	межі	2,54–5,29
		середнє	3,51
	ксенолітів	ВК13 [10]	1,60
		К1 [5]	2,65
		К3 [5]	2,75
Темна матриця [7]		2,90	0,79

Високе середнє значення та широкі межі коливань співвідношення $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$ тонкозернистої речовини (див. таблицю) свідчать про її високий ступінь окиснення і примітивізм. В окремих випадках речовина оболонок хондр примітивішша, ніж тонкозернистих вуглистих ксенолітів [5, 10] і стандартної темної матриці хондрита *Кримка* [7]. Особливості валового хімічного складу оболонок хондр однозначно свідчать про хімічну й, відповідно, мінералогічну неоднорідність на мікомасштабному рівні пилової компоненти протопланетної туманності в зоні акреції материнського тіла метеорита.

Згідно з літературними [3–5, 8, 10] та оригінальними даними, мінеральні компоненти тонкозернистих оболонок є продуктом налипання різнорідного пилу протопланетної туманності на поверхню сконденсованих хондр та інших консолідованих об'єктів. Отримані нами результати засвідчують, що основними компонентами пилу, який акумулювали хондри в період агломерації материнського тіла метеорита *Кримка*, були нанометричні та субмікронні силікатні й акцесорні метал-сульфідні зерна, уламки мікропорфірових хондр у вигляді окремих грубих зерен і їхніх фрагментів, а також мікрохондри. На відміну від нанометричних зерен, які належать до примітивного пилу протопланетної туманності [12], великі силікатні зерна оболонок можуть бути уламками хондр, тобто об'єктів, які утворились із крапель розплаву і мають диференційований хімічний склад.

Значна кількість силікатних зерен уламкової форми, зокрема фрагментованих зональних кристалів олівину, а також наявність залишків мезостазису свідчать про інтенсивні процеси співударяння і дроблення хондр переважно мікропорфірової будови з іншими консолідованими тілами в протопланетній туманності в період акреції материнського тіла метеорита.

Одним із цікавих компонентів оболонок хондр є високозалізисті олівінові пластинки (див. рис. 5), що їх фіксували попередні дослідники в тонкозернистій речовині матриці [13] та ксеноліту ВК13 [10] метеорита *Кримка*. Вивчення характеру поширення олівінових пластинок у тонкозернистій речовині дає змогу припустити їхнє утворення внаслідок фрагментації рідкісних ниткоподібних кристалів олівину [10] під час акреції пилової компоненти на поверхню хондр.

Мікрохондри (див. рис. 3, 7) як високотемпературний акцесорний компонент тонкозернистих оболонок належать, найімовірніше, до продукту переплавлення й перекоонденсації поверхневого шару хондр і тонкозернистого пилу [9]. На жаль, природа високоенергетичних процесів туманності досі не відома. Водночас уперше знайдені нами структури безпосереднього налипання мікрохондр на фрагментовані частково оплавлені хондри (див. рис. 8) засвідчують високу ймовірність утворення їх з перекоонденсованої речовини цих хондр або з мінерального пилу, що оточує хондри [2].

Отже, отримані дані свідчать про співіснування високотемпературних (хондри, мікрохондри) і низькотемпературних (мінеральний пил) об'єктів та активні процеси їхньої взаємодії між собою в період акреції материнських тіл метеоритів у хімічно й мінералогічно неоднорідному на мікромасштабному рівні газопиловому середовищі протопланетної туманності.

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

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Семененко В. П. Мінералогія пилової компоненти протопланетної туманності / В. П. Семененко // Записки Укр. мінерал. т-ва. – 2011. – Т. 8. – С. 175–178.
2. Семененко В. П. Особливості мінералогії мікрохондр в метеориті Кримка (LL3.1) / В. П. Семененко, К. О. Шкуренко // Записки Укр. мінерал. т-ва. – 2012. – Т. 9. – С. 58–66.
3. Alexander C. M. O. Origin of chondrule rims and interchondrule matrices in unequilibrated ordinary chondrites / C. M. O. Alexander, R. Hurchison and D. J. Barber // Earth and Planet. Sci. Lett. – 1989. – Vol. 95. – P. 187–207.
4. Brearley A. J. Nature of matrix in unequilibrated chondrites and its possible relationship to chondrules / A. J. Brearley // Chondrules and the Protoplanetary Disk : [Ed. R. H. Hewins et al.]. – Cambridge : Univ. Press, 1996. – P. 137–151.
5. Carbonaceous xenoliths in the Krimka LL3.1 chondrite: Mysteries and established facts / V. P. Semenenko, E. K. Jessberger, M. Chaussidon [et al.] // Geochim. Cosmochim. Acta. – 2005. – Vol. 69. – P. 2165–2182.
6. Greshake A. Mineralogy and chemistry of fine-grained matrices, rims, and dark inclusions in the CR carbonaceous chondrites Acfer/El Djouf 001 and the ungrouped carbonaceous chondrites Acfer 094 and Adelaide (abstract) / A. Greshake, A. N. Krot, K. Keil // Workshop on Chondrites and the Protoplanetary Disk. – Kauai, Hawaii, 2004. – N 9041.
7. Huss G. R. The matrices of unequilibrated ordinary chondrites: Implication for the origin and history of chondrites / G. R. Huss, K. Keil, G. J. Taylor // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1981. – Vol. 45. – P. 33–51.
8. Metzler K. Constraints on chondrite agglomeration from fine-grained chondrule rims / K. Metzler and A. Bishoff // Chondrules and the Protoplanetary Disk : [Ed. R. H. Hewins et al.]. – Cambridge : Univ. Press, 1996. – P. 153–161.
9. Microchondrules in ordinary chondrites: Implication for chondrule formation / A. N. Krot, A. E. Rubin, K. Keil, J. T. Wasson // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1997. – Vol. 61. – P. 463–473.
10. Mineralogy of fine-grained material in the Krimka (LL3.1) chondrite / V. P. Semenenko, A. Bishoff, I. Weber [et al.] // Meteoritics and Planet. Sci. – 2001. – Vol. 36. – P. 1067–1085.
11. Nagahara H. Matrices of type 3 ordinary chondrites – primitive nebular records / H. Nagahara // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1984. – Vol. 48. – P. 2581–2595.
12. Nanometer-sized mineral grains and their genetic types in meteorites / V. P. Semenenko, A. L. Girich, K. O. Shkurenko [et al.] // Meteorites. – 2011. – Vol. 1. – P. 13–19.

13. Weisberg M. K. Fayalitic olivine in matrix of the Krymka LL3.1 chondrite: Vapor-solid growth in the solar nebula / M. K. Weisberg, M. E. Zolensky and M. Prinz // *Meteoritics and Planet. Sci.* – 1997. – Vol. 32. – P. 791–801.

*Стаття: надійшла до редакції 19.03.2015
прийнята до друку 04.09.2015*

MINERALOGY OF FINE-GRAINED CHONDRULE RIMS IN THE *KRYMKA* (LL3.1) METEORITE

K. Shkurenko, V. Semenenko

*M. P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of NASU,
34a, Acad. Palladin Av., 03180 Kyiv-142, Ukraine
E-mail: cosmin@i.ua*

The results of mineralogical and chemical study of fine-grained chondrule rims of the *Krymka* meteorite (LL3.1) are given.

The chondrules mostly have microporphyritic structure and pyroxene-olivine composition. Ca-rich pyroxene grains and plagioclase mesostasis are minor. Ca-low pyroxene Fs_{1-25} and olivine Fa_{1-54} usually are depleted in FeO but ones on the chondrule periphery are slightly enriched in it.

Fine-grained rims consist of cryptocrystalline ($\ll 1 \mu m$) silicate material, fine ($< 5 \mu m$) and coarse ($> 5 \mu m$) grains and rare microchondrules. Cryptocrystalline material and fine grains form a kind of groundmass for coarse grains and microchondrules.

Fine-grained rims are characterized by the following chemical and mineralogical characteristics: 1) the rims are opaque; 2) they are macroscopically black coloured in nonoxidized parts and dark-brown or red-brown in oxidized parts; 3) they have cryptocrystalline and homogeneous structure; 4) they show multi-layering consisting of few concentric dust layers of different oxidation degree; 5) chondrule rims are brighter in reflected light than the matrix material because of higher abundance of fine metal and/or sulphide grains or FeO-rich silicates; 6) inner parts of the rims are enriched in metal and/or sulphide grains.

Bulk chemical composition of the fine-grained rims varies widely and according to the content of main components corresponds to the normative olivine Fa_{63-83} . In accordance with SiO_2/MgO ratio the most rims are characterized by enrichment in SiO_2 , indicating to their formation in a dusty environment depleted in refractory elements. Some rims are similar to those of the carbonaceous xenoliths K1, K3, and to a dark matrix of the *Krymka* chondrite, and probably belong to relicts of primary dust.

Chemical composition of fine and coarse silicate grains varies a lot: olivine – Fa_{9-88} and Fa_{1-96} , Ca-low pyroxene – Fs_{10-37} and Fs_{1-36} and Ca-high pyroxene – En_{29-67} Wo_{13-39} Fs_{4-39} and En_{18-85} Wo_{11-51} Fs_{2-45} . Most of them present as fragments. Availability of silicate fragments, in particular fragments of zonal olivine crystals, and mesostasis remains in fine-grained rims indicate to intensive collision and fragmentation of mostly microporphyritic chondrules in protoplanetary nebula during *Krymka* parent body accretion.

Microchondrules are rare high-temperature component of the fine-grained rims. They formed by remelting and recondensation of chondrules surface material and fine-grained dust around the chondrules because of a heating event. Unique structures of microchondrules sticking onto two chondrules surface are the evidence of these processes.

The results of the study indicate to active processes of interaction between low- and high-temperature components during accretion of the meteorite parent body within a chemically and mineralogically variable gas-dust environment of protoplanetary nebula.

Key words: meteorite, chondrite, chondrule rim, fine-grained material, microchondrule.

МИНЕРАЛОГИЯ ТОНКОЗЕРНИСТОГО ВЕЩЕСТВА ОБОЛОЧЕК ХОНДР В МЕТЕОРИТЕ *КРЫМКА* (LL3.1)

К. Шкуренко, В. Семенов

*Институт геохимии, минералогии и рудообразования имени Н. П. Семенов
НАН Украины, просп. акад. Палладина, 34, 03680 г. Киев, Украина
E-mail: cosmin@i.ua*

Приведено результаты структурно-минералогических и химических исследований тонкозернистых оболочек хондр метеорита *Крымка* (LL3.1). Валовый химический состав оболочек колеблется в широких пределах и по содержанию основных компонентов соответствует нормативному оливину Fa_{63-83} . Согласно соотношению SiO_2/MgO , большинство оболочек обогащено SiO_2 , что указывает на их формирование в пылевой среде, обедненной тугоплавкими элементами. Отдельные оболочки сходны с оболочками углистых ксенолитов K1, K3 и темной матрицей хондрита *Крымка* и, возможно, принадлежат к реликтам первичной пыли. Результаты исследований свидетельствуют об активных процессах взаимодействия между низко- и высокотемпературными компонентами в период аккреции материнского тела метеорита в химически и минералогически неоднородной газопылевой среде протопланетной туманности.

Ключевые слова: метеорит, хондрит, оболочка хондры, тонкозернистое вещество, микрохондра.