

УДК 523.681

**А.Л. Гіріч, В.П. Семененко, Н.В. Кичань**

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

## СТРУКТУРНО-МІНЕРАЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ФРАГМЕНТА ТЕМНОГО РІЗНОВИДУ ХОНДРИТА ЧЕЛЯБІНСЬК (LL5)

Наведено результати структурно-мінералогічного і хімічного дослідження одного із фрагментарних зразків хондрита Челябінськ (LL5). За будовою, мінеральним і хімічним складом зразок діагностується як темний різновид хондрита і подібний до інших темних зразків метеорита Челябінськ, вивчених попередниками. Головними мінералами є олівін ( $\text{Fa}_{28,4-29,8}$ ) і низькокальцієвий піроксен ( $\text{Fs}_{23,7-25,8}\text{En}_{74,1-74,7}\text{Wo}_{1,11-1,57}$ ). Другорядними — нікелісте залізо (камасит і теніт), троїліт, висококальцієвий піроксен ( $\text{Fs}_{8,76-9,64}\text{En}_{45,6-46,3}\text{Wo}_{44,8-45,2}$ ), нормативний плагіоклаз ( $\text{Ab}_{83,4-86,9}\text{An}_{9,28-12,4}\text{Or}_{3,30-6,37}$ ), хроміт, мериліт і хлоропатит. Наявність широкого спектра структур ударного метаморфізму та характер їх прояву вказують на багатостадійну ударно-метаморфічну історію материнського тіла хондрита Челябінськ. Найінтенсивніший удар у космічній історії метеорита, який супроводжувався переплавленням частини речовини за температури  $\geq 1450$  °C, пов'язаний, найімовірніше, з утворенням мономіктової брекчії на поверхні материнського тіла. Ступінь ударно-метаморфічного перетворення речовини дослідженого зразка визначено як S5, що відповідає ударному тиску 45–55 ГПа та ударній температурі 600–850 °C.

*Ключові слова:* метеорит, брекчія, хондрит, темний різновид, ударні чорні жилки, ударний метаморфізм, кора плавлення.

**Вступ.** 15 лютого 2013 р. відбулось падіння знаменитого кам'яного метеорита Челябінськ [1–3], основна маса якого упала в оз. Чебаркуль (РФ). Феєричний політ боліду супроводжувався його послідовною фрагментацією в атмосфері Землі і, відповідно, яскравими світловими та звуковими ефектами. На жаль, переляк жителів та окремі руйнування будівель у м. Челябінськ зумовили неймовірний ажіотаж серед засобів масової інформації. Як наслідок, з порушенням усіх правил найменування метеоритів, він був названий Челябінськом, південніше якого пролетів болід, а не Чебаркулем, куди упала його основна маса. До речі, на березі величезного озера розташовано місто з такою ж назвою. Багаторазова фрагментація метеорного тіла в атмосфері Землі призвела до випадіння кам'яного дощу. Було зібрано більше 1000 дрібних уламків вагою від 0,1 г до близько 20 кг [1–3]. Завдяки

ініціативі адміністрації Челябінської обл. із дна оз. Чебаркуль був вилучений найбільший зразок метеорита вагою 640 кг.

Невдовзі після падіння, а саме в березні 2013 р., кореспондентка української телестудії ICTV Тетяна Штан люб'язно подарувала Комітету по метеоритах НАН України для досліджень фрагментарний зразок метеорита Челябінськ вагою 1,1 г, який вона купила у жителів с. Депутатське, що знаходиться в 55 км на схід від оз. Чебаркуль.

Попередні дослідження показали [1–3, 7], що метеорит Челябінськ представлений світлим і темним різновидами і належить до звичайних хондритів LL5 з інтенсивним ступенем ударно-метаморфічного перетворення S4–5 і низьким ступенем вивітрювання W0. Домінує світлий різновид з типовою грубозернистою хондритовою текстурою. Темний різновид, що за об'ємом становить майже 20 % метеорита, складений реліктами грубозернистої хондритової речовини в чорній переплавленій дріб-

нозернистій матриці. За текстурними ознаками метеорит належить до ударних мономіктових брекчій. Обидва різновиди містять ударні чорні жилки і суттєво не розрізняються за мінеральним і хімічним складом, але є різними за структурою. На відміну від світлого різновиду, темний вміщує численні структури плавлення рудних мінералів, головним чином сульфідів, що зумовило його темно-сірий до чорного колір. Нижче викладені результати структурно-мінералогічних та хімічних досліджень подарованого зразка, який складений темним різновидом хондрита Челябінськ і містить ударні чорні жилки.

**Зразок та методи дослідження.** Фрагментарний зразок розміром  $1,1 \times 0,8$  см мав близьку до округлої форму і з двох сторін був покритий чорною корою плавлення товщиною  $<0,5$  мм. Колір свіжих відколів темно-сірий до чорного. Із розрізаного навпіл зразка були приготовані два поліровані шліфи площею  $0,8$  та  $0,7$   $\text{cm}^2$ , а також відібрані дрібні уламки для електронно-мікроскопічного дослідження поверхні кори плавлення і відколу метеорита.

Структурно-мінералогічні дослідження виконано за допомогою біокуляра МБС-10, оптичного мікроскопа марки ПОЛАМ Р-312 та сканувального електронного мікроскопа марки JSM-6490LV фірми Jeol, обладнаного енергодисперсійним спектрометром (EDS) марки INCA Penta FETx3. Склад мінералів визначено на мікроаналізаторі марки JXA-8200 фірми Jeol в Технічному центрі НАН України з використанням сили струму 10 нА та прискорювальної напруги 15 кВ; діаметр зонда 2 мкм. Як стандарти застосовано відомі природні мінерали. У ході обробки результатів рентгено-спектрального дослідження використано ZAF-поправку. Похибка аналізу складає 1,5 відн. % для головних елементів і 0,02 абс. % для другорядних.

**Основна частина зразка** складена темним різновидом хондритової речовини. Під біокуляром зразок темно-сірого кольору, має пори, тріщини, окремі ксеноморфні зерна рудних мінералів та рідкісні релікти хондр, що дозволяє припустити його належність до хондритів петрологічного типу 5. Згідно з оптично-мікроскопічними дослідженнями, з двох протилежних сторін полірованого шліфа метеорита діагностується кора плавлення, а також дві ударні чорні жилки. Структура хондрита нерівномірнотзерниста з реліктами мікро-

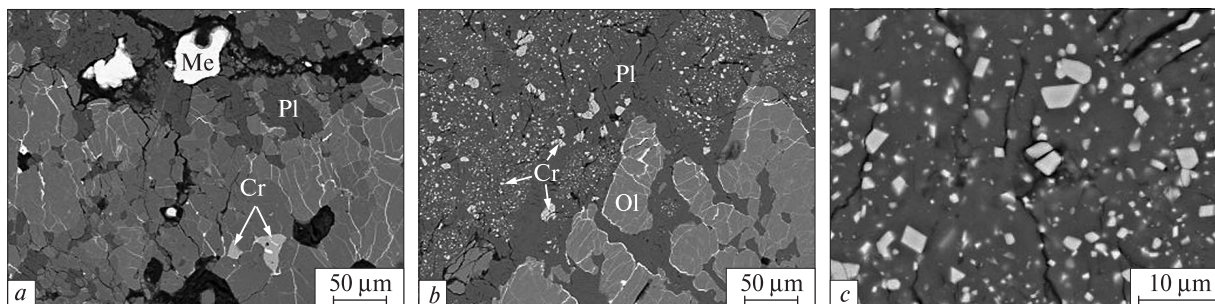
порфірових, інколи колосникових хондр, складених чітко видимими кристалами олівіну і піроксенів та мезостазисом. Силікатна маса хондрита пронизана тонкими прожилками сульфідів заліза і нікелістого заліза. Окремі округлі ділянки складені прихованокристалічними силікатами і переповнені мікрокристалами хроміту.

Ударні чорні жилки представлені силікатним склом з пилоподібними і сітчастими структурами плавлення сульфідів заліза і Fe, Ni-металу. Границя з основною частиною хондрита чітка. Всередині жилок збереглися окремі великі силікатні зерна і поодинокі мікрокристали хроміту. Загалом, якщо не брати до уваги поширеність структур ударного метаморфізму, то мінеральний склад і будова зразка є типовими для рівноважних хондритів [13], силікатна складова яких вміщує окремі великі зерна троїліту і нікелістого заліза, інколи хроміту і фосфатів.

Головними мінералами основної частини є олівін ( $\text{Fa}_{28,4-29,8}$ ) і низькокальцієвий піроксен ( $\text{Fs}_{23,7-25,8}\text{En}_{74,1-74,7}\text{Wo}_{1,11-1,57}$ ). Другорядними — нікелісте залізо (камасит і теніт), троїліт, висококальцієвий піроксен ( $\text{Fs}_{8,76-9,64} \times \text{En}_{45,6-46,3}\text{Wo}_{44,8-45,2}$ ), нормативний плагіоклаз ( $\text{Ab}_{83,4-86,9}\text{An}_{9,28-12,4}\text{Or}_{3,30-6,37}$ ), хроміт, мериліт і хлорапатит.

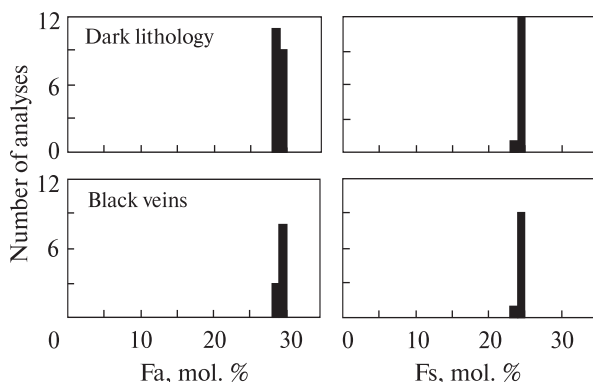
Олівін і піроксени представлені в основному ксеноморфними і неправильної форми тріщинуватими зернами і містять сульфідні прожилки (рис. 1, а). Олівін характеризується мозаїчним погасанням в поляризованому прохідному світлі. Хімічний склад олівіну і піроксенів коливається у вузьких межах від зерна до зерна (табл. 1; рис. 2) і співпадає з опублікованими даними [1–3, 7] як щодо темного, так і світлого різновидів хондрита Челябінськ. Невеликі розбіжності середнього хімічного складу силікатів до 2 мол. %, за різними літературними джерелами, можуть бути пов'язані з його відмінностями в різних зразках або з використанням різних еталонів і налаштувань для мікрозондових досліджень. У колосниковій олівіновій хондрі знайдено прожилки мікронної товщини, складений піроксеновим склом (у мас. %): 50,8  $\text{SiO}_2$ ; 19,5  $\text{MgO}$ ; 16,2  $\text{FeO}$ ; 9,36  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 0,90  $\text{Na}_2\text{O}$ ; 0,87  $\text{K}_2\text{O}$ ; 0,58  $\text{CaO}$ ; 0,30  $\text{MnO}$ ; 0,16  $\text{P}_2\text{O}_5$ ; сума — 98,6.

Окремі неправильної форми ділянки полірованого шліфа складені нормативним плагіоклазом (рис. 1, а), в якому, на відміну від



**Рис. 1.** Сканувальне електронно-мікроскопічне зображення у відбитих електронах (BSE) основної частини темного різновиду хондрита Челябінськ у полірованому шліфі: *a* — грубозерниста будова основної частини. Олівін, піроксени (px) і хроміт (Cr) інтенсивно пронизані прожилками сульфідів заліза (біле, світло-сіре), розташованими за міжзерновими границями і по тріщинах в зернах. *Me* — нікелісте залізо, *Pl* — плагіоклаз; *b* — центральна частина мікропорфірової хондри. Плагіоклазовий (Pl) мезостазис містить численні дрібні зерна хроміту (Cr). Ксеноморфні зерна олівіну (Ol) пронизані прожилками сульфідів заліза (біле, світло-сіре); *c* — мікронні і субмікронні кристали хроміту, розташовані в плагіоклазовому мезостазисі мікропорфірової хондри (*b*)

**Fig. 1.** Scanning electron microscopic image in backscattered electrons (BSE) of the dark lithology host within the polished section of the Chelyabinsk chondrite: *a* — coarse-grained structure of the host. Silicates (grey) and chromites (Cr) are intensively penetrated by iron sulfide veins (white, light grey), located over intergranular boundaries and in cracks within grains. *Me* — nickel-iron, *Pl* — plagioclase; *b* — central part of microporphyritic chondrule. Plagioclase (Pl) mesostasis contains numerous small chromite grains (Cr). Xenomorphic olivine (Ol) grains are penetrated by iron sulfide veins (white, light grey); *c* — micron and submicron crystals of chromite located within plagioclase mesostasis of microporphyritic chondrule (*b*)



**Рис. 2.** Вміст фаялітової (Fa) компоненти в олівіні та феросилітової (Fs) компоненти в низькокальцієвому піроксені темного різновиду (*Dark lithology*) і ударних чорних жилок (*Black veins*) хондрита Челябінськ

**Fig. 2.** Fa-contents of olivine and Fs-contents of Ca-poor pyroxene within the dark lithology and black shock veins of the Chelyabinsk chondrite

олівіну і піроксенів, дуже рідко трапляються сульфідні прожилки. Плагіоклаз характеризується невеликими варіаціями хімічного складу в межах ділянки (табл. 1). Один із реліктів мікропорфірової хондри наполовину складений плагіоклазовим мезостазисом з численними мікронними і субмікронними кристалами хроміту (рис. 1, *b*, *c*).

Нікелісте залізо (камасит і теніт) представлене великими і дрібними зернами неправильної форми та їх асоціаціями з троїлітом і хро-

мітом. На відміну від зерен нікелістого заліза рівноважних хондритів [5], які характеризуються однорідним розподілом Ni в камаситі і зональним в теніті, у дослідженому зразку ці мінерали мають неоднорідний хімічний склад, який змінюється від зерна до зерна і в межах зерен (табл. 2). За вмістом Ni і Co метал характеризується зворотною залежністю (рис. 3). Зерна теніту в більшості випадків містять невеликі домішки міді і хрому (табл. 2), але не містять фосфору (рис. 4). У деяких більших металевих зернах між тенітом і камаситом є неоднорідна за шириною і вмістом Ni перехідна зона плеситового складу. Прецизійні характеристики її складу отримано лише в одній точці (у мас. %): 84,8 Fe; 13,2 Ni; 1,45 Co; сума — 99,4.

Троїліт наявний у вигляді окремих зерен неправильної форми, а також численних прожилків у матриці і, дещо менше, хондрах за міжзерновими границями і по тріщинах у зернах силікатів, хроміту (рис. 1, *a*, *b*), інколи фосфатів. Він асоціює переважно з нікелістим залізом і хромітом. Більшість зерен троїліту сильно тріщинуваті, інколи вміщують округлі вclusions олівіну і плагіоклазу. Для великих зерен характерна полікристалічна будова, що видно в поляризаційному відбитому світлі. Границі монокристалів рівні. Троїліт характеризується незначною варіацією хімічного скла-

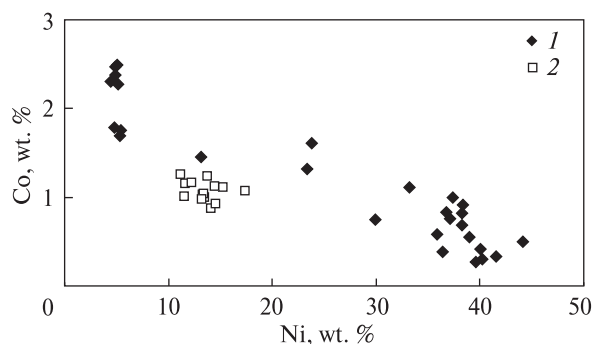


Рис. 3. Вміст Ni і Co в нікелістому залізі темного різновиду (1) і ударних чорних жилок (2) хондрита Челябінськ

Fig. 3. Ni vs. Co plot of the Fe, nickel-iron within the dark lithology (1) and black shock (2) veins of the Chelyabinsk chondrite

ду від зерна до зерна і містить до 0,58 мас. % Ni (табл. 2).

Електронно-мікроскопічні дослідження дрібних уламків зразка показали наявність сходинок росту на поверхні зерен теніту і трюліту (рис. 5), що вказує на їх кристалізацію за нерівноважних умов. Системи паралельних пластинок, помічені нами на відколах зерен трюліту, могли утворитись внаслідок дефор-

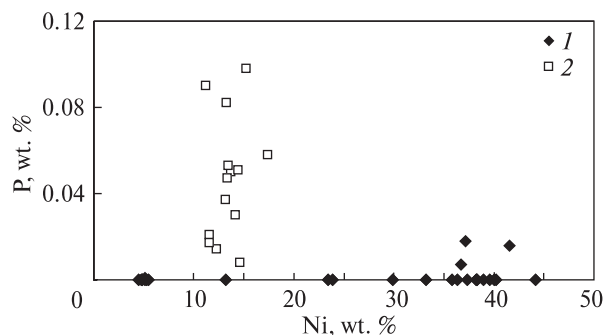


Рис. 4. Вміст Ni і P в нікелістому залізі темного різновиду (1) і ударних чорних жилок (2) хондрита Челябінськ

Fig. 4. Ni vs. P plot of the Fe, nickel-iron within the dark lithology (1) and black shock (2) veins of the Chelyabinsk chondrite

мації зсуву його кристалічної ґратки за помірного ударного метаморфізму. В полікристалічних зернах трюліту напрямок розташування пластинок зсуву індивідуальний для кожного монокрystalа.

Інші дослідники [2, 7] відмічали наявність сходинок росту на поверхні зерен теніту і трюліту, що розташовані в пустотах переплавленої речовини темного різновиду хондрита

Таблиця 1. Хімічний склад силікатів у темному різновиді хондрита Челябінськ (LL5), мас. %

Table 1. Chemical composition of silicates within the dark lithology of the Chelyabinsk (LL5) chondrite, wt. %

Компонент	Олівін		Піроксен		Са-піроксен		Плагіоклаз	
	межі (20)	середнє	межі (13)	середнє	межі (4)	середнє	межі (5)	середнє
SiO <sub>2</sub>	37,8—38,4	38,1	55,0—55,9	55,6	54,2—54,5	54,3	65,5—66,3	65,9
TiO <sub>2</sub>	Н. в.—0,14	0,03	0,10—0,25	0,17	0,40—0,48	0,43	Н. в.—0,04	0,03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Н. в.—0,01	0,00	0,06—0,19	0,13	0,43—0,48	0,46	20,8—21,7	21,2
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Н. в.—0,07	0,02	0,01—0,18	0,09	0,76—0,86	0,79	Н. в.—0,10	0,03
MgO	34,5—35,8	35,4	26,7—27,2	26,9	15,5—15,9	15,7	0,01—0,04	0,03
FeO	25,1—26,2	25,8	15,3—16,1	15,7	5,32—5,92	5,58	0,50—0,75	0,58
MnO	0,38—0,52	0,45	0,41—0,50	0,45	0,22—0,29	0,24	Н. в.—0,03	0,01
CaO	Н. в.—0,16	0,04	0,56—0,79	0,68	21,4—21,5	21,4	1,95—2,61	2,17
Na <sub>2</sub> O	Н. в.—0,03	0,01	Н. в.—0,02	0,01	0,51—0,58	0,53	9,70—10,3	10,0
K <sub>2</sub> O	Н. в.—0,03	0,01	Н. в.—0,04	0,01	Н. в.—0,03	0,01	0,59—1,15	0,83
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Н. в.—0,42	0,05	Н. в.—0,03	0,01	0,01—0,04	0,02	Н. в.—0,04	0,02
Σ	—	99,9	—	99,8	—	99,6	—	100,8
Fa	28,4—29,8	29,0	—	—	—	—	—	—
Fo	70,2—71,6	71,0	—	—	—	—	—	—
Fs	—	—	23,7—24,8	24,3	8,76—9,64	9,15	—	—
En	—	—	74,1—74,7	74,4	45,6—46,3	45,9	—	—
Wo	—	—	1,11—1,57	1,35	44,8—45,2	44,9	—	—
Ab	—	—	—	—	—	—	83,4—86,9	85,2
An	—	—	—	—	—	—	9,28—12,4	10,2
Or	—	—	—	—	—	—	3,30—6,37	4,62

Примітка. (Тут і в табл. 2—4) у дужках вказано кількість аналізів; Н. в. — не визначено.

Note. (Here and in Tables 2—4) the number of analyses is in brackets; Н. в. — is not determined.

Челябінськ. Наші дослідження показали, що такі структури характерні також для цих мінералів у грубозернистій частині темного різновиду.

Хроміт представлений зернами неправильної форми (рис. 1, *a*), іноді в асоціації з металом і троїлітом, а також скупченнями мікронних ідіоморфних кристалів (рис. 1, *b, c*), розташованими в плагіоклазовому мезостазисі. Більшість зерен тріщинуваті і пронизані сульфідними прожилками. Хімічний склад хроміту змінюється від зерна до зерна і характеризується наявністю підвищених концентрацій тугоплавких компонентів ( $Al_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $TiO_2$  і  $V_2O_5$ ; табл. 3), що свідчить про його високо-температурне утворення. В плагіоклазовому мезостазисі мікропорфірової хондри (рис. 1, *b*), що містить численні дрібні зерна хроміту, знайдено також невелике (30 мкм) неправильної

форми зерно алюмінійстого хроміту (20,7 мас. %  $Al_2O_3$ ; табл. 3).

Фосфати (хлорапатит і мериліт) наявні у вигляді амебоподібних зерен. Великі зерна (<100 мкм), як правило, тріщинуваті. Фосфати характеризуються незначним коливанням хімічного складу від зерна до зерна і незначним вмістом домішок (табл. 3).

**Ударні чорні жилки** розташовані з двох сторін зразка по краю, що не дозволяє нам коректно визначити їх ширину. Принаймні, в найширшому місці вона складає не менше 850 мкм. Жилки мають однорідну дрібнозернисту будову (рис. 6, *a*). Вони складені тонкорозкристалізованим силікатним склом, в якому розташовані окремі більші (<100 мкм) зерна олівіну і піроксену (рис. 6, *b*). Більшість силікатних зерен ксеноморфні. Частина зерен олівіну має зональну будову з окисненими світлими края-

Таблиця 2. Хімічний склад рудних мінералів у темному різновиді, ударних чорних жилках та корі плавлення хондри Челябинськ (LL5), мас. %

Table 2. Chemical composition of ore minerals within the dark lithology, black shock veins and fusion crusts of the Chelyabinsk (LL5) chondrite, wt. %

Елемент	Темний різновид хондри					
	Троїліт		Теніт		Камасит	
	межі (14)	середнє	межі (18)	середнє	межі (8)	середнє
Fe	61,3–62,7	61,7	53,8–74,2	62,9	91,4–93,6	93,0
Ni	0,15–0,58	0,42	23,4–44,2	36,3	4,46–5,46	4,99
Co	Н. в.—0,12	0,05	0,27–1,61	0,73	1,70–2,49	2,14
Cu	Н. в.—0,09	0,02	0,01–0,19	0,09	Н. в.—0,03	0,01
Cr	Н. в.—0,27	0,05	Н. в.—0,75	0,09	Н. в.—0,18	0,06
S	35,8–36,5	36,2	Н. в.—0,02	0,00	Н. в.—0,01	0,00
P	Н. в.—0,01	0,00	Н. в.—0,02	0,00	Н. в.	Н. в.
Si	Н. в.—0,2	0,01	Н. в.—0,02	0,01	Н. в.—0,02	0,01
Ca	Н. в.—0,03	0,01	Н. в.—0,03	0,01	Н. в.—0,01	0,00
Σ	—	98,7	—	100,2	—	100,2

Елемент	Ударні чорні жилки				Кора плавлення	
	Троїліт		Плесит		Хізлевудит	
	межі (5)	середнє	межі (14)	середнє	межі (2)	середнє
Fe	60,9–62,0	61,5	82,3–86,8	84,7	3,01–3,51	3,26
Ni	0,12–0,35	0,28	11,2–17,4	13,6	72,8–75,9	74,4
Co	0,02–0,10	0,08	0,87–1,25	1,07	0,04–0,06	0,05
Cu	Н. в.—0,09	0,04	Н. в.—0,08	0,01	Н. в.—0,04	0,02
Cr	0,17–0,29	0,22	0,03–0,11	0,06	0,03–0,07	0,05
S	36,1–36,7	36,4	Н. в.—0,11	0,03	20,0–25,3	22,7
P	Н. в.—0,01	0,00	0,01–0,10	0,05	Н. в.	Н. в.
Si	Н. в.—0,10	0,04	Н. в.—0,03	0,02	Н. в.—0,03	0,01
Ca	0,01–0,05	0,02	0,01–0,05	0,03	0,01–0,03	0,02
Σ	—	98,5	—	99,5	—	100,4

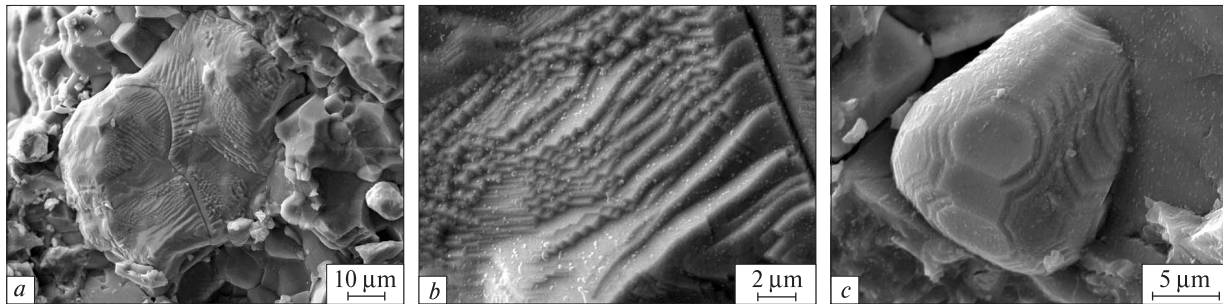


Рис. 5. Сканувальне електронно-мікроскопічне зображення у вторинних електронах поверхні відколу темного різновиду хондрита Челябінськ: *a* — зерно теніту зі складною системою сходинок росту; *b* — ускладнені сходинки росту на поверхні зерна теніту (*a*); *c* — сходинки росту на поверхні дрібного зерна троїліту

Fig. 5. Scanning electron microscopic images in secondary electrons of a broken surface of the Chelyabinsk chondrite dark lithology: *a* — taenite grain with complicated system of growth steps; *b* — complicated growth steps at the surface of taenite grain (*a*); *c* — growth steps at the surface of a small troilite grain

ми, поодинокі збагачені пилоподібними рудними зернами (рис. 6, *b*). Хімічний склад олівіну ( $\text{Fa}_{28,8-29,7}$ ) і низькокальцієвого піроксену ( $\text{Fs}_{23,9-24,9}\text{En}_{73,6-75,1}\text{Wo}_{0,97-1,75}$ ) (табл. 4; рис. 2) досить однорідний і подібний до складу цих мінералів в основній частині зразка (табл. 1; рис. 2). Зерен висококальцієвого піроксену не знайдено, однак інші дослідники [2, 7] фіксували його в чорних жилках метеорита Челябінськ. Окремі неправильної форми ділянки (~70 мкм) складені плагіоклазовим склом (маскелінітом) і збагачені мікронними і субмікронними кристалами хроміту. За складом ( $\text{Ab}_{73,4-79,7}\text{An}_{16,6-24,0}\text{Or}_{2,65-3,68}$ ) (табл. 4) маске-

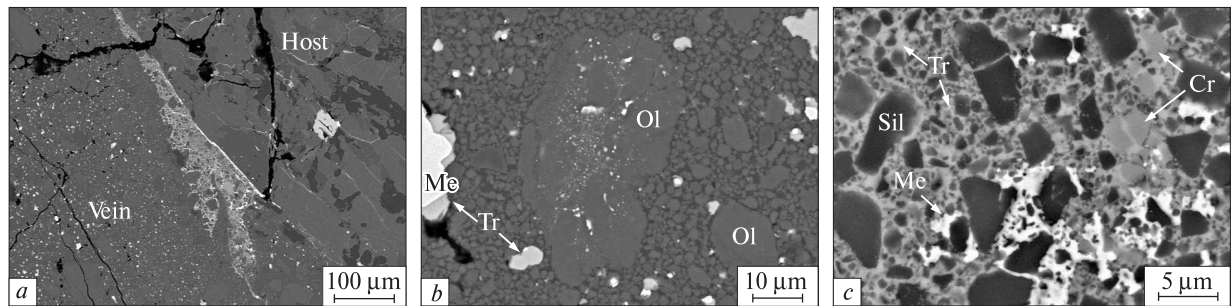
лініт відрізняється від нормативного плагіоклазу основної частини (табл. 1) більшим вмістом анортитової компоненти, що вказує на його високотемпературне утворення, найімовірніше, із ударного розплаву.

Численні дрібні зерна нікелістого заліза і троїліту рівномірно поширені серед силікатів (рис. 6, *a*) і подекуди утворюють видовжені вздовж жилки скупчення. Такі скупчення є типовими для речовини ударних чорних жил і свідчать про градієнт швидкості руху розплаву в центральній і периферійних зонах [18]. У переважній більшості випадків нікелісте залізо і троїліт асоціюють. Їхні зерна округ-

Таблиця 3. Хімічний склад хромітів і фосфатів у темному різновиді хондрита Челябінськ (LL5), мас. %

Table 3. Chemical composition of chromites and phosphates within the dark lithology of the Chelyabinsk (LL5) chondrite, wt. %

Компонент	Хроміт		Al-хроміт	Cl-апатит		Мериліт	
	межі (19)	середнє	середнє (2)	межі (6)	середнє	межі (5)	середнє
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	51,4–55,4	54,2	43,4	Н. в.—0,04	0,02	Н. в.—0,02	0,00
FeO	31,0–33,3	32,2	28,2	0,13–1,22	0,84	0,42–1,22	0,82
$\text{Al}_2\text{O}_3$	5,59–7,60	6,14	20,7	Н. в.—0,01	0,00	Н. в.—0,01	0,00
$\text{SiO}_2$	Н. в.—0,15	0,03	0,05	0,02–0,12	0,05	0,01–0,02	0,01
MgO	1,30–3,21	1,91	5,34	Н. в.—0,12	0,07	3,42–3,60	3,50
$\text{TiO}_2$	2,30–3,66	2,95	0,98	Н. в.—0,04	0,01	Н. в.—0,01	0,00
MnO	0,42–0,54	0,46	0,33	Н. в.—0,07	0,03	Н. в.—0,06	0,03
CaO	Н. в.—0,09	0,02	0,04	51,7–53,9	53,0	45,7–46,2	46,0
$\text{Na}_2\text{O}$	Н. в.—0,03	0,00	0,01	0,26–0,62	0,46	2,27–2,70	2,52
$\text{K}_2\text{O}$	Н. в.—0,01	0,00	Н. в.	Н. в.—0,04	0,02	0,04–0,07	0,05
$\text{P}_2\text{O}_5$	Н. в.	Н. в.	" "	40,7–42,7	41,5	46,7–47,3	47,0
ZnO	0,16–0,49	0,30	0,22	Н. в.—0,05	0,02	Н. в.	Н. в.
$\text{V}_2\text{O}_3$	0,51–0,83	0,74	0,18	Н. в.—0,02	0,00	Н. в.—0,04	0,02
F	Н. в.	Н. в.	Н. в.	0,89–1,04	0,95	0,52–0,65	0,58
Cl	" "	" "	" "	3,47–5,43	4,46	Н. в.—0,01	0,00
$\Sigma$	—	98,9	99,5	—	101,4	—	100,5



*Рис. 6. BSE зображення ударних чорних жилок хондрита Челябінськ у полірованому шліфі: a — межа між тонкозернистою ударною чорною жилкою (Vein) і основною грубозернистою частиною (Host) темного різновиду. В чорній жилці рівномірно розташовані дрібні зерна троїліту і нікелістого заліза (біле, світло-сіре). На межі з основною частиною (в центрі) — видовжена сітчасто-комірчаста структура плавлення сульфідів заліза і Fe, Ni-металу (біле, світло-сіре); b — грубе полікристалічне зерно олівіну (Ol), збагачене пилоподібними рудними зернами (біле). Me — нікелісте залізо, Tr — троїліт; c — будова сітчасто-комірчастої структури плавлення (a). Троїліт (Tr) і нікелісте залізо (Me) складають каркас, а зерна силікатів (Sil) і хроміту (Cr) — комірчки*

*Fig. 6. BSE images of the black shock veins within a polished section of the Chelyabinsk chondrite: a — boundary between fine-grained black shock vein and coarse-grained host of the dark lithology. Small troilite and Fe, nickel-iron grains (white, light grey) uniformly distributed within the black vein. An elongated cellular melting structure of iron sulfide and Fe, nickel-iron (white, light grey) locates at the boundary with the host (in center); b — coarse polycrystalline olivine (Ol) grain enriched with dusty ore grains (white). Me — nickel-iron, Tr — troilite; c — texture of the cellular melting structure (a). Troilite (Tr) and nickel-iron (Me) make a frame, silicate (Sil) and chromite (Cr) grains make cells*

*Таблиця 4. Хімічний склад силікатів, хроміту і фосфатів в ударних чорних жилах хондрита Челябінськ (LL5), мас. %*  
*Table 4. Chemical composition of silicates, chromites and phosphates within the black shock veins of the Chelyabinsk (LL5) chondrite, wt. %*

Компонент	Олівін		Піроксен		Плагіоклаз	Хроміт		Cl-апатит
	межі (11)	середнє	межі (10)	середнє	середнє (2)	межі (5)	середнє	середнє (3)
SiO <sub>2</sub>	37,9—38,5	38,3	55,4—56,0	55,7	65,3	0,04—0,07	0,05	0,08
TiO <sub>2</sub>	Н. в.—0,03	0,01	0,11—0,25	0,17	0,02	1,39—3,14	2,00	0,02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Н. в.—0,02	0,01	0,12—0,21	0,15	22,0	6,00—6,67	6,32	0,01
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Н. в.—0,12	0,03	0,07—0,20	0,12	0,05	53,3—56,2	54,9	0,02
MgO	35,0—36,1	35,4	26,5—27,5	26,9	0,14	1,54—1,94	1,72	0,10
FeO	25,6—26,4	25,9	15,5—16,0	15,8	0,88	31,6—32,7	32,0	1,03
MnO	0,41—0,47	0,45	0,43—0,49	0,46	0,02	0,39—0,48	0,44	0,04
CaO	Н. в.—0,04	0,02	0,49—0,89	0,66	3,15	Н. в.—0,07	0,04	52,5
Na <sub>2</sub> O	Н. в.—0,02	0,00	Н. в.—0,04	0,02	6,54	Н. в.—0,06	0,01	0,26
K <sub>2</sub> O	Н. в.—0,03	0,01	Н. в.—0,02	0,01	0,41	Н. в.	Н. в.	Н. в.
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Н. в.—0,07	0,02	Н. в.—0,03	0,01	0,02	" "	" "	41,4
ZnO	Н. в.—0,11	0,02	Н. в.—0,06	0,01	0,02	0,21—0,56	0,37	0,02
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Н. в.—0,03	0,01	Н. в.—0,04	0,02	0,03	0,70—0,81	0,76	0,02
F	Н. в.	Н. в.	Н. в.	Н. в.	Н. в.	Н. в.	Н. в.	0,88
Cl	" "	" "	" "	" "	" "	" "	" "	5,43
Σ	—	100,2	—	100,0	98,6	—	98,6	101,8
Fa	28,8—29,7	29,1	—	—	—	—	—	—
Fo	70,3—71,2	70,9	—	—	—	—	—	—
Fs	—	—	23,9—24,9	24,4	—	—	—	—
En	—	—	73,6—75,1	74,3	—	—	—	—
Wo	—	—	0,97—1,75	1,31	—	—	—	—
Ab	—	—	—	—	76,5	—	—	—
An	—	—	—	—	20,3	—	—	—
Or	—	—	—	—	3,16	—	—	—

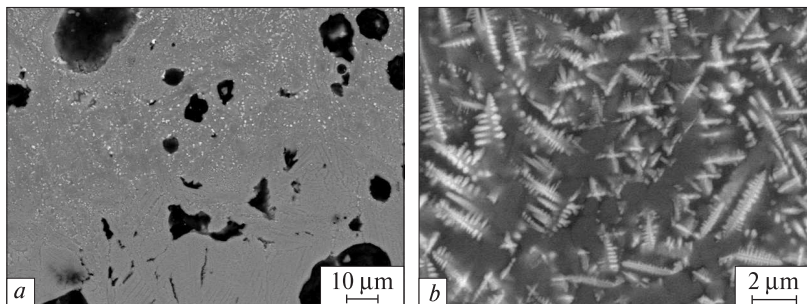


Рис. 7. BSE зображення кори плавлення хондрита Челябінськ у полірованому шліфі: *a* — межа між зовнішньою (зверху) і внутрішньою (знизу) зонами, зовнішня переповнена мікронними і субмікронними кристалами магнетиту (світло-сірі крапки), чорне — пори; *b* — дендритоподібні кристали магнетиту у зовнішній зоні

Fig. 7. BSE images of the fusion crust within a polished section of the Chelyabinsk chondrite: *a* — boundary between the external (above) and inner (below) zones, external zone crowded by micron and submicron magnetite crystals (light grey dots), black — pores; *b* — dendrite-like magnetite crystals within the external zone

лі або ксеноморфні і містять ознаки часткового плавлення у вигляді відгалужень. Зерна Fe, Ni-металу містять субмікронні включення, які важко ідентифікувати. В окремих випадках, переважно на границі з основною частиною зразка, наявні видовжені ділянки розміром до 400 мкм, представлені сітчастими (в об'ємі — комірчастими) структурами плавлення троїліту і металу (рис. 6, *a*). Метал і троїліт у таких структурах містять зерна силікатів, іноді хроміту (рис. 6, *c*).

На відміну від основної частини зразка, нікелісте залізо чорних жилوک характеризується досить однорідним плеситовим складом і підвищеним вмістом P (табл. 2; рис. 3, 4). Підвищений вміст фосфору в нікелістому залізі є типовим для ударних чорних жилوک і ударно-переплавлених ділянок різних хондритів [4, 15] і є індикатором переплавлення з подальшим швидким остиганням зерен нікелістого заліза в результаті ударного метаморфізму [16]. Інші дослідники [2, 7] у чорних жилках хондрита Челябінськ відмічали теніт і камасит. Троїліт за хімічним складом подібний до троїліту з основної частини зразка і також містить домішки Ni (табл. 2).

Хроміт є акцесорним мінералом ударних чорних жилوک і трапляється у вигляді окремих дрібних зерен неправильної форми та скупчень мікронних кристалів у плагіоклазовому склі. Хімічний склад хроміту (табл. 4) коливається від зерна до зерна і в більшості випадків подібний до хроміту з основної частини зразка (табл. 3). Ідіоморфні зерна, розташовані у плагіоклазовому склі, характеризуються високим вмістом  $Al_2O_3$  (до 15,9 мас. %), але їх прецизійні аналізи отримати не вдалося. Знай-

дено окремі мікронні зерна хлоропатиту, за складом (табл. 4) подібні до зерен у темному різновиді (табл. 3).

**Кора плавлення** має чорний колір, її товщина змінюється в широких межах — від 20 до 370 мкм. Вона пориста і має зональну будову (рис. 7, *a*): зовнішню і внутрішню зони, причому внутрішня зона може бути відсутня за невеликої товщини кори плавлення. Пори різного розміру (<50 мкм) і різної форми (від округлих і видовжених до амебоподібних) розповсюджені нерівномірно незалежно від зони. Сусідні пори часто з'єднані між собою. Зональна будова кори плавлення зумовлена різницею у швидкості її остигання в залежності від відстані до краю. Зовнішня зона утворена слабборозкристалізованим склом олівінового складу з низьким вмістом фаялітової компоненти ( $Fa_{12,6}$ ) і домішками  $Al_2O_3$ , CaO,  $P_2O_5$ ,  $Cr_2O_3$  і  $Na_2O$  (у мас. %): 40,6  $SiO_2$ ; 43,4  $MgO$ ; 11,1  $FeO$ ; 0,47  $Cr_2O_3$ ; 0,35  $Al_2O_3$ ; 0,23  $MnO$ ; 0,20  $CaO$ ; 0,14  $P_2O_5$ ; 0,07  $Na_2O$ ; сума — 96,6. Низька аналітична сума в мікрозондовому аналізі, найімовірніше, зумовлена пористою будовою скла. У склі досить рівномірно розташовані численні скелетні та ідіоморфні кристали магнетиту мікронного і субмікронного розміру (рис. 7, *a, b*). Внутрішня зона не містить кристалів магнетиту і складена переважно скелетними силікатними зернами олівінового складу з підвищеним вмістом фаялітової компоненти ( $Fa_{34,4}$ ) та домішок у порівнянні із зовнішньою зоною (у мас. %): 41,9  $SiO_2$ ; 26,1  $MgO$ ; 24,4  $FeO$ ; 2,28  $Al_2O_3$ ; 1,6  $CaO$ ; 0,53  $Cr_2O_3$ ; 0,4  $MnO$ ; 0,35  $Na_2O$ ; 0,15  $P_2O_5$ ; 0,12  $TiO_2$ ; 0,11  $K_2O$ ; сума — 98,1. Між зонами немає чіткої межі, вони поступово переходять одна в іншу.



Поодинокі кульки хроміту діаметром до 10 мкм розташовані переважно в зовнішній зоні. Знайдені також окремі мікронні кульки хізлевудиту  $(\text{Ni, Fe})_3\text{S}_2$ , інколи в асоціації з високонікелістим залізом. Середній склад хізлевудиту за двома аналізами такий (у мас. %): 74,4 Ni; 22,6 S; 3,26 Fe; 0,05 Co; 0,05 Cr; сума — 100,4. Інші дослідники в корі плавлення метеорита Челябінськ встановили ільменіт, годлевскіт  $(\text{Ni, Fe})_7\text{S}_6$ , пентландит  $(\text{Ni, Fe})_9\text{S}_8$ , піротин і вюстит [1, 2, 8].

**Ударно-метаморфічна історія метеорита.** Згідно з літературними даними [1—3, 7], метеорит Челябінськ належить до ударних мономіктових брекчій. Він представлений світлим і темним різновидами хондритової речовини, які є подібними за хімічним та мінеральним складом і розрізняються між собою лише за структурою. Вважають [10, 11], що формування таких брекчій відбувається на поверхні материнських тіл метеоритів внаслідок численних співударів з іншими тілами, що зумовило неоднорідне ударно-метаморфічне перетворення реголітового шару з наступною цементацією однотипних, але різною мірою змінених уламків. Найбільш змінені з них набули темно-сірого до чорного кольору.

Проведені нами дослідження фрагментарного зразка темного різновиду хондрита Челябінськ і наявність у ньому ударних чорних жиллок підтверджують попередні висновки [1—3, 7] про суттєве поширення в хондриті структур ударного метаморфізму, до яких належать структури крихких (тріщинуватість, брекчіювання, розриви, зсуви деформаційних пластинок та монокристалів у троїліті) і пластичних деформацій (деформаційні пластинки в троїліті), структури ударного нагріву (полікристалічна будова троїліту, мозаїчне погасання олівіну, силікатні включення в нікелістому залізі і троїліті, амебоподібна форма зерен нікелістого заліза, часткова розкристалізація плагіоклазового мезостазиу хондр), а також структури плавлення (пилоподібні, сітчасті та каркасні структури троїліту і нікелістого заліза, локальні ділянки плавлення в силікатах, зокрема наявність маскелініту та піроксенового скла, повне переплавлення речовини в ударних чорних жилках). За шкалою Д. Штоффлера та ін. [17], ступінь ударно-метаморфічного перетворення речовини дослідженого зразка визначено як S5, що відповідає ударному тиску 45—55 ГПа та індукованій ним температурі 600—850 °С.

В основній частині зразка наявні тріщини різного походження. Широко розвинута нерегулярна і площинна тріщинуватість зерен більшості мінералів (в основному силікатів і хроміту), яка відмічається і в світлому різновиді хондрита [1—3], але відсутня в чорних ударних жилках, має космічне походження. Переважна більшість таких тріщин і мікротріщин у темному різновиді заповнена сульфідами заліза, інколи — разом з нікелістим залізом, що свідчить про часткове плавлення цих мінералів за локального підвищення температури до 988, а місцями і до 1450 °С (температура плавлення троїліту і нікелістого заліза відповідно) і швидке остигання. На відміну від нікелістого заліза [14], сульфіди заліза мають високу змочувальну властивість щодо силікатів [6, 9, 12], що зумовило їх швидке проникнення в основну силікатну масу по тріщинах і міжзернових границях під дією капілярного тиску, величина якого збільшується зі зменшенням ширини тріщини [18]. Окремі дрібні і грубі тріщини, що перетинають структурні одиниці незалежно від їхніх меж, а також тріщини в зернах троїліту утворились, найімовірніше, під час виготовлення шліфа.

На жаль, ми не можемо чітко визначити кількість співударів у космічній історії материнського тіла метеорита Челябінськ, оскільки найінтенсивніший із них повністю знищив всі структурно-мінералогічні та хімічні ознаки попередніх ударів внаслідок ударного нагріву до температури плавлення окремих мінералів. Можна лише констатувати, що виникнення хондрита як мономіктової брекчії є результатом найінтенсивнішого удару в його доземній історії, який зумовив брекчіювання і неоднорідне ударно-метаморфічне перетворення поверхневого шару материнського тіла хондрита. Саме в цей період внаслідок підвищення ударної температури до  $\geq 1450$  °С і утворення локальних ударних розплавів, зокрема всепроникного сульфідного, відбулося формування темного різновиду хондрита. Наступний менш інтенсивний удар зумовив фрагментацію частини реголітового шару материнського тіла та екскавацію і викид у космічний простір його уламків.

Наявність у дослідженому зразку таких ознак ударного метаморфізму, як полікристалічна будова троїліту і мозаїчне погасання олівіну, свідчить про подальші менш інтенсивні удари в космічній історії метеорита, які спри-

яли рекристалізації цих мінералів. До цього ж періоду, ймовірно, відноситься і поява структур пластичних, а потім і крихких деформацій сульфідних зерен, зокрема зсув деформаційних пластинок та монокристалів у троїліті.

**Висновки.** 1. За будовою, мінеральним і хімічним складом досліджений нами фрагментарний зразок належить до темного різновиду хондрита Челябінськ (LL5). Він подібний до інших зразків метеорита, складених темним різновидом, і від світлого різновиду хондрита відрізняється лише структурою.

2. Наявність широкого спектра структур ударного метаморфізму та характер їх прояву вказують на багатостадійну ударно-метаморфічну історію материнського тіла хондрита Челябінськ.

3. Формування хондрита як мономіктові брекчії є результатом найінтенсивнішого удару в космічній історії його материнського тіла і супроводжувалось частковим переплавленням речовини за температури  $\geq 1450$  °С.

4. Ступінь ударно-метаморфічного перетворення речовини дослідженого зразка визначено як S5, що відповідає ударному тиску 45—55 ГПа та ударній температурі 600—850 °С.

*Автори глибоко вдячні Тетяні Штан за безкоштовну передачу Комітету по метеоритах НАН України зразка метеорита Челябінськ, а також висловлюють щире подяку В.Б. Соболеву і В.М. Сливінському за технічну допомогу у проведенні мікрозондових та електронно-мікроскопічних досліджень.*

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Анфилогов В.Н., Белогуб Е.В., Блинов И.А., Еремяшев В.Е., Кабанова Л.Я., Лебедева С.М., Лонцакова Г.Ф., Хворов П.В. Петрография, минералогия и строение метеорита "Челябинск" // Литосфера. — 2013. — № 3. — С. 118—129.
2. Берзин С.В., Ерохин Ю.В., Иванов К.С., Хиллер В.В. Особенности минерального и геохимического состава метеорита "Челябинск" // Литосфера. — 2013. — № 3. — С. 106—117.
3. Галимов Э.М., Колотов В.П., Назаров М.А., Костицин Ю.А., Кубракова И.В., Кононкова Н.Н., Рощина И.А., Алексеев В.А., Кашкаров Л.Л., Бадюков Д.Д., Севастьянов В.С. Результаты вещественного анализа метеорита Челябинск // Геохимия. — 2013. — № 7. — С. 580—598.
4. Семенов В.П., Перрон К. Ударно-переплавленные участки в хондрите Крымка LL3) // Минерал. журн. — 1996. — 18, № 4. — С. 26—37.
5. Соботович Э.В., Семенов В.П. Вещество метеоритов. — Киев : Наук. думка, 1984. — 191 с.
6. Чирвинский П.Н. Палласиты, их минералого-химический состав, положение в ряду других метеоритов и вопросы происхождения. — М. : Недра, 1967. — 288 с.
7. Шарыгин В.В., Карманов Н.С., Подгорных Н.М., Томиленко А.А. Минералогия и петрография "проплавленно-го" фрагмента метеорита Челябинск // Материалы Всерос. науч. конф. "Метеорит Челябинск — год на Земле". — Челябинск, 2014. — С. 637—653.
8. Шарыгин В.В., Тимина Т.Ю., Карманов Н.С., Томиленко А.А., Подгорных Н.М. Минеральные ассоциации в коре оплавления фрагментов метеорита Челябинск // Материалы Всерос. науч. конф. "Метеорит Челябинск — год на Земле". — Челябинск, 2014. — С. 654—666.
9. Barnes S.J., Fiorentini M.L., Austin P., Gessner K., Hough R.M., Squelch A.P. Three-dimensional morphology of magmatic sulfides sheds light on ore formation and sulfide melt migration // Geology. — 2008. — 36. — P. 655—658.
10. Bischoff A., Scott E.R.D., Metzler K., Goodrich C.A. Nature and origins of meteoritic breccias // Meteorites and the Early Solar System II / Eds. D.S. Lauretta, H.Y. McSween Jr. — Tucson : Univ. of Arizona Press, 2006. — P. 679—712.
11. Bunch T.E., Rajan R.S. Meteorite regolithic breccias // Meteorites and the Early Solar System / Ed. J.F. Kerridge, M.S. Matthews. — Tucson : Univ. of Arizona Press, 1988. — P. 144—164.
12. Gaetani G.A., Grove T.L. Wetting of mantle olivine by sulfide melt: implications for Re/Os ratios in mantle peridotite and late-stage core formation // Earth and Planet. Sci. Lett. — 1999. — 169. — P. 147—163.
13. Krot A.N., Keil K., Goodrich C.A., Scott E.R.D. Classification of meteorites // Treatise on geochemistry. Vol. 1. Meteorites, comets and planets / Ed. A.M. Davis. — Oxford : Elsevier-Pergamon, 2004. — P. 83—128.
14. Minarik W.G., Ryerson F.J., Watson B.E. Textural entrapment of core-forming melts // Science. — 1996. — 272. — P. 530—533.
15. Semenenko V.P., Golovko N.V. Shock-induced black veins and organic compounds in ordinary chondrites // Geochim. et cosmochim. acta. — 1994. — 58. — P. 1525—1535.
16. Semenenko V.P., Perron C. Shock-melted material in the Крымка LL3.1 chondrite: Behavior of the opaque minerals // Meteoritics and Planet. Sci. — 2005. — 40. — P. 173—185.
17. Stöffler D., Keil K., Scott E.R.D. Shock metamorphism of ordinary chondrites // Geochim. et cosmochim. acta. — 1991. — 55. — P. 3845—3867.
18. Tomkins A.G., Weinberg R.F., Schaefer B.F., Langendam A. Disequilibrium melting and melt migration driven by impacts: Implications for rapid planetesimal core formation // Geochim. et cosmochim. acta. — 2013. — 100. — P. 41—59.

Надійшла 27.07.2015

## REFERENCES

1. Anphilogov, V.N., Belogub, E.V., Blinov, I.A., Eremyashev, V.E., Kabanova, L.Y., Lebedeva, S.M., Lonschakova, G.F. and Khvorov, P.V. (2013), *Lithosphere*, Yekaterinburg, No 3, pp. 118-129.
2. Berzin, S.V., Erokhin, Y.V., Ivanov, K.S. and Hiller, V.V. (2013), *Lithosphere*, Yekaterinburg, No 3, pp. 106-117.
3. Galimov, E.M., Kolotov, V.P., Nazarov, M.A., Kostitsin, Y.A., Kubrakova, I.V., Kononkova, N.N., Roshchina, I.A., Alekseev, V.A., Kashkarov, L.L., Badykov, D.D. and Sevastianov, V.S. (2013), *Geokhimiya*, Moskva, Vol. 51 No 7, pp. 580-598.
4. Semenenko, V.P. and Perron, K. (1996), *Mineral. Journ. (Ukraine)*, Kyiv, Vol. 18 No 4, pp. 26-37.
5. Sobotovich, E.V. and Semenenko, V.P. (1984), *Veshchestvo meteoritov*, Naukova dumka, Kiev, 192 p.
6. Chirvinskiy, P.N. (1967), *Pallasity, ih mineralogo-himicheskii sostav, polozenie v ryadu drugih meteoritov i voprosy proishozhdeniya*, Nedra, Moskva, 288 p.
7. Sharyhin, V.V., Karmanov, N.S., Podhornykh, N.M. and Tomilenko, A.A. (2014), *Materialy Vseros. nauch. konf. "Mereorit Chelyabinsk - god na Zemle"*, Chelyabinsk, pp. 637-653.
8. Sharyhin, V.V., Timina, N.Yu., Karmanov, N.S., Tomilenko, A.A. and Podhornykh, N.M. (2014), *Materialy Vseros. nauch. konf. "Mereorit Chelyabinsk - god na Zemle"*, Chelyabinsk, pp. 654-666.
9. Barnes, S.J., Fiorentini, M.L., Austin, P., Gessner, K., Hough, R.M. and Squelch, A.P. (2008), *Geology*, Vol. 36, pp. 655-658.
10. Bischoff, A., Scott, E.R.D., Metzler, K. and Goodrich, C.A. (2006), *Meteorites and the Early Solar System II*, in Lauretta, D.S. and McSween Jr., H.Y. (eds), Univ. of Arizona Press, Tucson, pp. 679-712.
11. Bunch, T.E. and Rajan, R.S. (1988), *Meteorites and the Early Solar System*, in Kerridge, J.F. and Matthews, M.S. (eds), Univ. of Arizona Press, Tucson, pp. 144-164.
12. Gaetani, G.A. and Grove, T.L. (1999), *Earth and Planet. Sci. Lett.*, Vol. 169, pp. 147-163.
13. Krot, A.N., Keil, K., Goodrich, C.A. and Scott, E.R.D. (2004), *Treatise on geochemistry*, Vol. 1, *Meteorites, comets and planets*, in Davis, A.M. (ed.), Elsevier-Pergamon, Oxford, pp. 83-128.
14. Minarik, W.G., Ryerson, F.J. and Watson, B.E. (1996), *Science*, Vol. 272, pp. 530-533.
15. Semenenko, V.P. and Golovko, N.V. (1994), *Geochim. et cosmochim. acta*, Vol. 58, pp. 1525-1535.
16. Semenenko, V.P. and Perron, C. (2005), *Meteoritics and Planet. Sci.*, Vol. 40, pp. 173-185.
17. Stöffler, D., Keil, K. and Scott, E.R.D. (1991), *Geochim. et cosmochim. acta*, Vol. 55, pp. 3845-3867.
18. Tomkins, A.G., Weinberg, R.F., Schaefer, B.F. and Langendam, A. (2013), *Geochim. et cosmochim. acta*, Vol. 100, pp. 41-59.

Received 27.07.2015

*А.Л. Гирич, В.П. Семененко, Н.В. Кичань*

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

СТРУКТУРНО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ФРАГМЕНТА  
ТЕМНОЙ РАЗНОВИДНОСТИ ХОНДРИТА ЧЕЛЯБИНСК (LL5)

Приведены результаты структурно-минералогического и химического исследования одного из фрагментарных образцов хондрита Челябинск (LL5). По строению, минеральному и химическому составу образец диагностирован как темная разновидность хондрита и подобен другим темным образцам метеорита Челябинск, изученным предыдущими исследователями. Главные минералы — оливин ( $\text{Fa}_{28,4-29,8}$ ) и низкокальциевый пироксен ( $\text{Fs}_{23,7-25,8} \times \text{En}_{74,1-74,7} \text{Wo}_{1,11-1,57}$ ). Второстепенные — никелистое железо (камасит и тенит), троилит, высококальциевый пироксен ( $\text{Fs}_{8,76-9,64} \text{En}_{45,6-46,3} \text{Wo}_{44,8-45,2}$ ), нормативный плагиоклаз ( $\text{Ab}_{83,4-86,9} \text{An}_{9,28-12,4} \text{Or}_{3,30-6,37}$ ), хромит, мерриллит и хлорапатит. Наличие широкого спектра структур ударного метаморфизма и характер их проявления указывают на многостадийную ударно-метаморфическую историю родительского тела хондрита Челябинск. Самый интенсивный удар в космической истории метеорита, который сопровождался переплавлением части вещества при температуре  $\geq 1450$  °C, вероятно, связан с образованием мономиктовой брекчии на поверхности родительского тела. Степень ударно-метаморфического преобразования вещества изученного образца определена как S5, что соответствует ударному давлению 45—55 ГПа и ударной температуре 600—850 °C.

**Ключевые слова:** метеорит, брекчия, хондрит, темная разновидность, ударные черные жилки, ударный метаморфизм, кора плавления.

A.L. Girich, V.P. Semenenko, N.V. Kychan

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

#### STRUCTURAL-MINERALOGICAL CHARACTERISTIC OF A DARK LITHOLOGY FRAGMENT OF THE CHELYABINSK (LL5) CHONDRITE

The results of structural-mineralogical and chemical study of one of fragmentary samples of the Chelyabinsk (LL5) chondrite are given. Tetiana Shtan, correspondent of Ukrainian television studio ICTV, presented this sample to the Committee for Meteorites of the NAS of Ukraine for research. The sample is 1.1 g in weight,  $1.1 \times 0.8$  cm in size and has a round shape and a fusion crust on two sides. According to the structure, mineral and chemical compositions the sample was diagnosed as a dark lithology of chondrite and is similar to other dark samples of the Chelyabinsk meteorite studied by previous researchers. The sample has a typical irregular-grained chondritic texture with chondrule relicts and rare Fe, Ni-iron and troilite assemblages and composes two black shock veins. The majority of silicates are penetrated by iron sulfide microveins. Main minerals are olivine ( $\text{Fa}_{28.4-29.8}$ ) and Ca-poor pyroxene ( $\text{Fs}_{23.7-25.8}\text{En}_{74.1-74.7}\text{Wo}_{1.11-1.57}$ ). Secondary ones are Fe, Ni-iron (kamacite and taenite), troilite, Ca-rich pyroxene ( $\text{Fs}_{8.76-9.64}\text{En}_{45.6-46.3}\text{Wo}_{44.8-45.2}$ ), normative plagioclase ( $\text{Ab}_{83.4-86.9}\text{An}_{9.28-12.4}\text{Or}_{3.30-6.37}$ ), chromite, merrillite and chloroapatite. The black shock veins are composed by a fine-recrystallized silicate glass with coarse olivine and pyroxene grains and are enriched with small troilite and Fe, Ni-iron grains. The presence of a widespread shock metamorphism structures and the character of their display indicate the multistage shock-metamorphic history of the Chelyabinsk chondrite parent body. The most intensive impact in the cosmic history of the meteorite, accompanied by the melting of some part of the material at temperature  $\geq 1450$  °C, is probably connected with formation of a monomict breccia on the surface of its parent body. The stage of a shock-metamorphic transformation of the studied sample material was identified as S5, that corresponds to the shock pressure 45–55 GPa and shock temperature 600–850 °C.

*Keywords:* meteorite, breccia, chondrite, dark lithology, shock black veins, shock metamorphism, fusion crust.