DOI  
УДК 523.681

Ширінбекова С.Н.

Ширінбекова С.Н., кандидат геологічних наук, Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення імені М.П. Семененка НАН України, ORCID: 0000-0003-3872-0399, svetlana\_shirinbekova@ukr.net

## ХІМІЧНИЙ СКЛАД І БУДОВА ПРОДУКТІВ ЗВІТРЮВАННЯ Fe,Ni-МЕТАЛУ ХОНДРИТА ГРУЗЬКЕ (H4)

Зі звітряними зернами Fe,Ni-металу (камаситу  $\alpha$ -(Fe,Ni), теніту  $\gamma$ -(Fe,Ni), плеситу  $\alpha+\gamma$ -(Fe,Ni)) звичайного хондрита Грузьке (H4) генетично пов'язані вторинні мікроструктури звітрювання: 1) оксидні оболонки; 2) оксидні прожилки; 3) псевдоморфози продуктів вивітрювання. У порожнистому просторі всередині деяких псевдоморфоз виявлені рідкісні мікроглобулярні корозійні продукти. Різноманітні структури звітрювання склалися з дисперсних сумішей вторинних оксигідроксидів заліза – гетиту  $\alpha$ -FeO(OH) та гідрогетиту FeO(OH) $\cdot$ nH<sub>2</sub>O, які поширювалися з периферії всередину металевих зерен. Припускаємо наявність лепідокрокіту  $\gamma$ -FeO(OH). Гідроксиди заліза характеризуються: неоднорідним сірим забарвленням; різною будовою, наявністю заміщених ділянок плямистої, коломорфної, шаруватої будови; пористістю та зональністю; варіаціями вмісту FeO і NiO. До складу оксидної оболонки крупного зерна Fe,Ni-металу входять (середн. з 4-х ан., у дужках – межі вмісту, мас. %): FeO 82,7 (81,6–83,8); NiO 10,9 (10,4–11,7); SO<sub>3</sub> 4,88 (4,23–5,92); а також CoO 0,79 (до 1,31); CuO 0,14 (до 0,57); MnO 0,14 (до 0,54); MgO 0,16; K<sub>2</sub>O + CaO 0,13; Cl 0,17 (до 0,26). Псевдоморфоза гідроксиду заліза містить (середн. із 3-х ан., межі – у дужках, мас. %): FeO 92,6 (92,1–93,0); NiO 3,5 (2,72–4,02); SiO<sub>2</sub> 3,86 (3,32–4,96); Cl 0,08 (до 0,24). Зазначені особливості генетично пов'язані з фазовою та хімічною неоднорідністю нікелістого заліза, з низьким вмістом Ni в  $\alpha$ -(Fe,Ni), що зумовлює пріоритетне окиснення та заміщення камаситу та плеситу, порівняно з тенітом. Окиснення метеоритного Fe,Ni-металу відбувалося за участю води, на що вказує безпосередній просторовий зв'язок зерен нікелістого заліза з гідрогетитом. Суцільно звітрянні зерна Fe,Ni-металу, у яких втрачені первинні структурні та хімічні характеристики, варто обмежено використовувати для інтерпретації доземних процесів утворення речовини метеорита. Низький вміст Cl < 0,3 мас. % в оксигідроксидах заліза Fe є свідченням їхньої низької корозійної активності, через що буде гальмуватися подальша корозія та заміщення Fe,Ni-металу. Це запобігатиме окисненню та деградації речовини хондрита Грузьке під час лабораторного дослідження та зберігання метеоритного зразка.

**Ключові слова:** хондрит Грузьке, Fe,Ni-метал, гідроксид заліза, гетит, гідрогетит, псевдоморфоза, вивітрювання.

**Вступ.** Усебічне вивчення речовини метеоритів необхідне для розуміння ранньої історії Сонячної системи та законів еволюції космічної речовини, що тісно пов'язано з вирішенням питання про походження Землі [1]. Речовина метеоритів зазнавала змін на різних етапах своєї еволюції, за космічних і земних умов. Материнські тіла метеоритів формувалися у високовідновному, без- і маловодному космічному середовищі [1–3]. За окисних умов земної поверхні метеоритна речовина зазнає повільної деградації під впливом процесів вивітрювання [4]; зміни метеоритів зумовлені їхніми первинними структурно-мінералогічними та хімічними характеристиками [5]. Звітрювання нікелістого заліза (Fe,Ni) метеоритів відбувається за механізмом електрохімічної корозії [6]. За умов вологого помірно-континентального клімату Fe,Ni-метал заміщується на оксигідроксиди заліза – гетит  $\alpha$ -FeO(OH), гідрогетит FeO(OH) $\cdot$ nH<sub>2</sub>O, лепідокрокіт  $\gamma$ -FeO(OH), а також на водний фосфат касидіт Ca<sub>2</sub>Ni(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O [4].

Детальне вивчення Fe,Ni-металу та продуктів його вивітрювання звичайного хондрита Грузьке (H4,

знахідка 2007 р., Кіровоградська область, Україна) дозволить зробити внесок у вирішення питання корозії та звітрювання, консервації та зберігання метеоритних зразків у лабораторіях і музейних колекціях.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Попередньо досліджувалися структурно-мінералогічні характеристики метеорита Грузьке [7], визначено його приналежність до високозалізистої H групи 4-го петрологічного типу [7], відповідно до хіміко-петрологічної класифікації хондритів [8]. Вивчалися структури ударного метаморфізму метеорита, ступінь якого відповідає S4 [7; 9]. За час перебування у ґрунтовому середовищі речовина хондрита досить помітно звітрянлася з поверхні та зсередини до стадії W2 [7], згідно із класифікацією стадій вивітрювання звичайних хондритів [10]. Наведено характеристику ознак корозії та заміщення Fe,Ni-металу та трюїліту FeS [11].

**Мета дослідження.** Мета роботи – на основі подальшого вивчення змін хімічного складу та будови звітрянених зерен Fe,Ni-металу деталізувати особливості

впливу природних умов на фази камаситу  $\alpha$ -(Fe,Ni), теніту  $\gamma$ -(Fe,Ni) і плеситу  $\alpha+\gamma$ -(Fe,Ni) та загалом на речовину цього метеорита.

На основі послідовної діагностики складу продуктів вивітрювання оцінити поширеність інертних і активних корозійних фаз, за необхідності скорегувати рекомендації щодо збереження зразка в метеоритній колекції Національного науково-природничого музею (далі – ННПМ) НАНУ.

**Методи дослідження.** Об'єкти дослідження: звітлі зерна Fe,Ni-металу хондрита Грузьке вивчалися в полірованому шліфі площею  $\sim 2 \text{ см}^2$  за допомогою двох сканувальних електронних мікроскопів JSM-6490LV фірми JEOL (Японія), обладнаних енергодисперсійними спектрометрами (далі – ЕДС): 1) марки INCA Penta FETx3 Oxford Instruments (ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України»), 2) марки INCA Energy+ з енерго- та хвильодисперсійними спектрометрами (EDS + WDS, Oxford, Велика Британія, Інститут геологічних наук НАНУ). Електронно-мікроскопічне вивчення метеоритного зразка проведено у вторинних (SEI) і відбитих (BEC) електронах за напруги 20 V. З використанням ЕДС здійснено послідовну діагностику хімічного складу метеоритного металу та корозійних продуктів за напруги 30 кВ, з діаметром зонда 3 мкм.

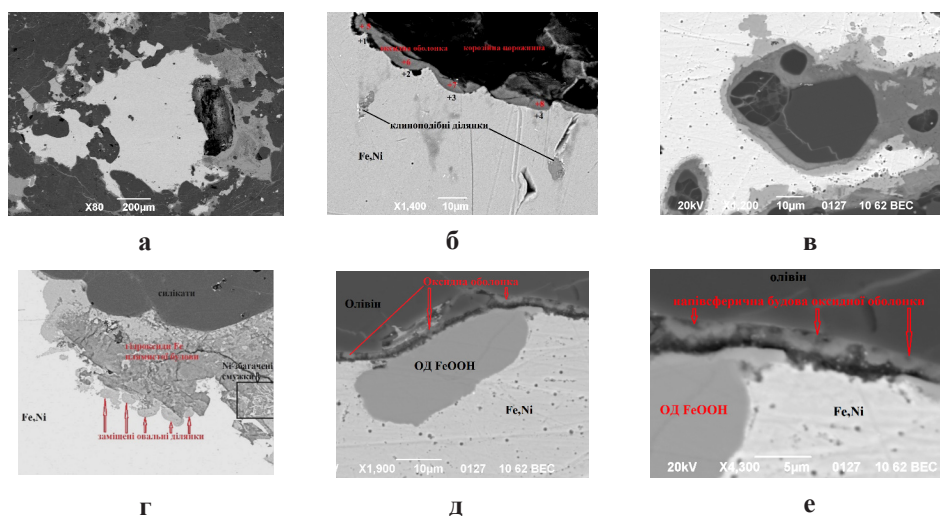
**Виклад основного матеріалу дослідження.** Зерна Fe,Ni-металу вивченого зразка за ступенем вивітрювання поділено на незмінні, мало змінні, помірно та суцільно звітрілі, останні нерідко є порожнистими зсередини. Продукти вивітрювання (далі – ПВ) Fe,Ni-металу, за даними робіт [5; 7; 11], складаються з дисперсної суміші оксигідроксидів заліза – гетиту та гідрогетиту, які характеризуються неоднорідним забарвленням із варіаціями відтінків сірого кольору від світлого до темного, пористістю, коломорфною

будовою та зональністю. Унаслідок їхнього поширення з периферії всередину зерен утворилися локальні вторинні структури (рис. 1–3): а) оксидні оболонки (далі – ОО); б) оксидні прожилки (далі – ОПр); в) псевдоморфози (далі – Пс).

Зональні ОО спостерігалися в більшості зерен Fe,Ni-металу, в основному великих амєбоподібних зерен камаситу, меншою мірою навколо зонального теніту, також вони наявні вздовж фазової межі з мінеральними включеннями в нікелістому залізі. ОПр у Fe,Ni-металі розвинулися вздовж: деформаційних тріщин; кристалічних меж у полікристалічних зернах, нерідко з утворенням сіточки в них; фазової межі у зростках із FeS. Концентрично-зональну будову Пс зумовлено заміщенням зональних зерен теніту.

У результаті звітрювання крупного зерна Fe,Ni-металу неправильної форми розміром  $\sim 0,8 \times 1,0 \text{ мм}$ , що, очевидно, становить зросток  $\alpha$ -(Fe,Ni) і  $\gamma$ -(Fe,Ni) (рис. 1, а), проявилися різні за будовою та розташуванням корозійні структури: ОО з периферії (рис. 1, а, д, е) та зсередини між металом і корозійною порожниною (далі – КП) (рис. 1, б), навколо включень силікатів у металі (рис. 1, в); дрібні периферійні заміщені ділянки овальної форми (рис. 1, г – е); псевдоморфне заміщення  $\sim$  третини площі на гідроксиди Fe плямистої (рис. 1, г), шаруватої, коломорфної будови [11]; а також велика КП усередині зерна (рис. 1, а, б).

Незмінений Fe,Ni-метал представлений камаситом, із середнім вмістом (мас. %): 92,1 Fe, 6,88 Ni (рис. 1, б, табл. 1). Оксидна оболонка хвилястої форми, що утворилася на межі  $\alpha$ -(Fe,Ni) з КП, вигнута вбік металу. За складом (табл. 1, ОО) вона відповідає гідратованій фазі, очевидно, гідрогетиту, що містить дещо більше Ni порівняно з металом. Окрім того, припускаємо корозійну природу клиноподібних ділянок, наявних на металевій поверхні (рис. 1, б).



**Рис. 1.** Структури звітрювання крупного зерна Fe,Ni-металу хондрита Грузьке. Режим відбитих електронів

**Fig. 1.** Secondary weathering structures of a large grain of iron-nickel of the Gruz'ke chondrite. Backscattered electron image

Однорідна за будовою та забарвленням заміщена овальною ділянкою (далі – ОД) (рис. 1, д) складається, найвірогідніше, із суміші гідратованих оксидів заліза  $\alpha$ -FeO(OH) та FeO(OH)·nH<sub>2</sub>O, містить постійну концентрацію FeO (табл. 2). За підвищенням середнім вмістом Ni 8,12 мас. % та його варіаціями, за вмістом Co, що є збіжним із таким у незміненому металі, зроблено висновок про утворення ОД в результаті заміщення  $\alpha$ -(Fe,Ni) та  $\alpha$ + $\gamma$ -(Fe,Ni).

Виявлено напівсферичну будову вторинної ОО (рис. 1, д, е), що виникла внаслідок заповнення гідроксидами заліза тріщини між зерном Fe,Ni-металу та суміжним із ним олівіном. Дослідниками спостерігалися жилки гетиту та гідрогетиту, що проникли вздовж тріщин зламу катаклазованих ділянок, тріщин спайності та поміж зернами силкатів у речовині звітрілого хондрита Северный Колчим [4]. Утворення концентрично-зональної структури таких жилок зумовлено груповим ростом сферолітів гетиту на нерівній поверхні стінок метеорита, на яких відбувався геометричний відбір сферолітів [4]. Припускаємо, що напівсферичні гідроксиди Fe

в ОО звітрілого Fe,Ni-металу хондрита Грузьке утворилися за тим же законом. Відмінність між хімічним складом ОД та ОО (табл. 2) можна пояснити з урахуванням способу утворення корозійних продуктів, відповідно, безпосереднім заміщенням металевих зерен та шляхом проникнення їх уздовж тріщин. Наявність Mg і Si у складі напівсферолітів (табл. 2, ОО) зумовлена їх захопленням під час вимірювання із суміжного зерна олівіну, оскільки ширина ОО ~ 3,33 мкм у точці аналізу є збіжною з діаметром зонда.

Зерна Fe,Ni-металу складної будови зазнали значного звітрювання з утворенням зональних гідроксидів заліза (рис. 2, а-в).

Залишковий метал, що представлений  $\alpha$ -(Fe,Ni) фазою (рис. 2, б, табл. 3, ЗНЗ), унаслідок вибіркового заміщення набув корозійної полігональної форми. Хімічний аналіз показав зниження концентрації заліза у темно-сірій фазі продуктів вивітрювання, порівняно з світло-сірою вторинною фазою. Це дозволяє зробити висновок про роль вологи у корозії метеоритного металу.

**Таблиця 1.** Хімічний склад (мас. %) незміненого Fe,Ni-металу й оксидної оболонки (ОО) на межі з корозійною порожниною крупного звітрілого зерна нікелістого заліза, полірований шліф хондрита Грузьке

**Table 1.** Chemical composition (wt.%) of unaltered Fe-Ni metal and oxide rim (OR) on the boundary with corrosion cavity within the large weathered grain of iron-nickel, the polished section of the Gruz'ke chondrite

	Fe,Ni	Fe,Ni	OO (OR)	OO (OR)	OO (OR)	OO (OR)	OO (OR)
	Межі (ан. 1–4)	Середнє (4)	Межі (ан. 5–8)	Середнє (4)		Межі (ан. 5–8)	Сер. (4)
<b>Fe</b>	91,4–92,7	92,1	56,1–60,3	58,3	<b>FeO</b>	81,6–83,8	82,7
<b>Ni</b>	6,51–7,34	6,88	7,25–8,57	7,71	<b>NiO</b>	10,4–11,7	10,9
<b>Co</b>	Н. в. – 1,54	0,87	Н. в. – 0,93	0,57	<b>CoO</b>	Н. в. – 1,31	0,79
<b>Cu</b>	Н. в.	Н. в.	Н. в. – 0,40	0,1	<b>CuO</b>	Н. в. – 0,57	0,14
<b>Mn</b>	Н. в. – 0,30	0,08	Н. в. – 0,38	0,1	<b>MnO</b>	Н. в. – 0,54	0,14
<b>S</b>	Н. в. – 0,22	0,06	1,5–2,04	1,73	<b>SO<sub>3</sub></b>	4,23–5,92	4,88
<b>Mg</b>	Н. а.	Н. а.	Н. в. – 0,31	0,08	<b>MgO</b>	Н. в. – 0,62	0,16
<b>K</b>	Н. а.	Н. а.	Н. в. – 0,13	0,03	<b>K<sub>2</sub>O</b>	Н. в. – 0,18	0,05
<b>Ca</b>	Н. а.	Н. а.	Н. в. – 0,20	0,05	<b>CaO</b>	Н. в. – 0,31	0,08
<b>Cl</b>	Н. в.	Н. в.	Н. в. – 0,24	0,16	<b>Cl</b>	Н. в. – 0,26	0,17

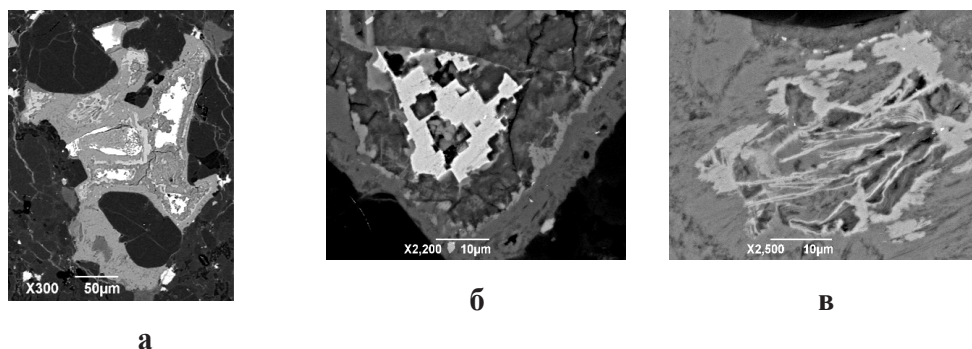
**Примітка.** Н. в. (= 0,0) – елемент/компонент не виявлено, зокрема не виявлено Cr, P, Si у металі, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O – у гідроксидах заліза. Н. а. – не аналізували. Незначний вміст 1–4 мас. % O у Fe,Ni-металі не включено до суми аналізів. Середнє (4) – середнє значення вмісту, у дужках – кількість аналізів.

**Таблиця 2.** Хімічний склад (мас. %) однорідної сірої овальної ділянки (ОД), периферійної оксидної оболонки (ОО) навколо ОД, у крупному зерні Fe,Ni-металу, хондрит Грузьке

**Table 2.** Chemical composition (wt.%) of the homogeneous grey oval-shaped corrosion area (OvalA), the peripheral oxide rim (OR) around the oval-shaped area within the large weathered grain of iron-nickel, the Gruz'ke chondrite

	ОД (OvalA)	ОД (OvalA)	ОО (OR)		ОД (OvalA)	ОД (OvalA)	ОО (OR)
	Середнє (4)	Межі	1		Середнє (4)	Межі	1
<b>Fe</b>	60,5	60,1–60,9	55,6	<b>FeO</b>	84,7	84,3–85,1	85,4
<b>Ni</b>	8,12	7,84–8,50	Н. в.	<b>NiO</b>	11,3	10,9–11,8	Н. в.
<b>Co</b>	0,65	0,39–0,82	Н. в.	<b>CoO</b>	0,90	0,55–1,14	Н. в.
<b>Si</b>	0,10	Н. в. – 0,14	1,83	<b>SiO<sub>2</sub></b>	0,24	Н. в. – 0,33	4,94
<b>S</b>	1,02	0,83–1,14	Н. в.	<b>SO<sub>3</sub></b>	2,83	2,32–3,15	Н. в.
<b>Mg</b>	Н. а.	Н. а.	4,62	<b>MgO</b>	Н. а.	Н. а.	9,71
<b>Cl</b>	0,05	Н. в. – 0,20	Н. в.	<b>Cl</b>	0,06	Н. в. – 0,23	Н. в.
<b>O</b>	29,6	29,3–30,2	37,9				

**Примітка.** CuO, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, MnO та Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = Н. в.



**Рис. 2.** а – в. Суттєво заміщене зерно Fe,Ni-металу із продуктами вивітрювання, ПВ (неоднорідно сіре), у силікатній матриці (темно-сіре): а – загальне зображення; б – ділянка залишкового нікелістого заліза, ЗНЗ (біле) серед ПВ; в – тонка зональність гідроксидів заліза; хондрит Грузьке. Режим відбитих електронів

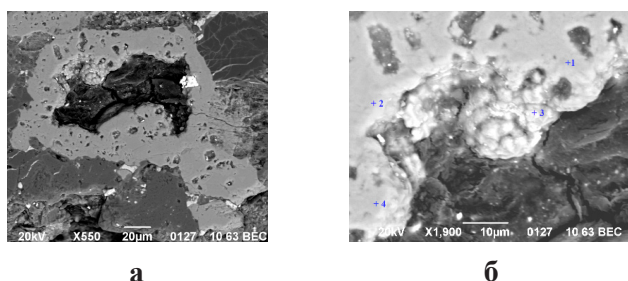
**Fig. 2.** The grain of Fe-Ni metal is significantly replaced by weathering products (iron hydroxides, inhomogeneous grey), in the silicate matrix (dark grey): а – general view; б – an area of the residual iron-nickel (white) among weathering products; в – fine zonal structure of iron hydroxides, the Gruz'ke chondrite. Backscattered electron image

**Таблиця 3.** Склад (мас. %) суттєво заміщеного зерна Fe,Ni-металу та його продуктів вивітрювання, хондрит Грузьке

**Table 3.** Composition (wt.%) of the significantly replaced grain of Fe-Ni and its weathering products (light/dark grey Fe hydroxide), the Gruz'ke chondrite

	ЗНЗ ( $\alpha$ -Fe,Ni)	ЗНЗ ( $\alpha$ -Fe,Ni)	ПВ (Fe hydroxide)	ПВ (Fe hydr.)	С/с ПВ (light grey Fe hydr.)	С/с ПВ (light grey Fe hydr.)	Т/с ПВ (dark grey Fe hydr.)	Т/с ПВ (dark grey Fe hydr.)
	Серед. (3)	Межі	Серед. (3)	Межі	Серед. (3)	Межі	Серед. (3)	Межі
<b>Fe</b>	91,4	91,6–93,8	54,8	50,7–59,9	60,5	58,5–61,8	45,4	43,6–48,0
<b>Ni</b>	6,64	6,21–7,01	7,56	5,03–9,52	4,26	2,28–7,32	10,2	9,04–11,7
<b>Co</b>	0,66	Н. в. – 1,48	0,73	0,50–1,07	0,56	Н. в. – 0,89	0,31	Н. в. – 0,51
<b>Cu</b>	0,13	Н. в. – 0,39	0,12	Н. в. – 0,37	0,13	Н. в. – 0,39	Н. в.	Н. в.
<b>Cr</b>	0,08	Н. в. – 0,24	Н. в.	Н. в.	Н. в.	Н. в.	0,10	Н. в. – 0,31
<b>Si</b>	Н. в.	Н. в.	0,70	0,48–0,85	0,91	0,58–1,25	2,73	1,89–3,18
<b>S</b>	Н. в.	Н. в.	0,43	0,39–0,47	0,27	Н. в. – 0,51	0,27	Н. в. – 0,52
<b>Al</b>	Н. в.	Н. в.	Н. в.	Н. в.	Н. в.	Н. в.	0,09	Н. в. – 0,26
<b>Cl</b>	0,09	Н. в. – 0,26	0,11	Н. в. – 0,17	Н. в.	Н. в.	Н. в.	Н. в.
<b>O</b>	–	–	35,61	32,8–37,4	33,4	32,5–33,8	41,0	39,9–42,2

**Примітка.** Вміст P, Mn = Н. в.; Mg, Na, K, Ca = Н. а. і Н. в. ЗНЗ – залишкове нікелісте залізо ( $\alpha$ -Fe,Ni), до його аналізів не включено незначну кількість O (2,32 мас. % у серед. із 3 ан., межі 1,9–2,8 мас. %). ПВ – продукт вивітрювання (гідроксид Fe, Fe hydroxide), ділянки якого містяться всередині ЗНЗ. С/с ПВ – світло-сірий ПВ (light grey Fe hydroxide). Т/с ПВ – тріщинуватий темно-сірий ПВ (dark grey Fe hydroxide), між ЗНЗ і оксидною оболонкою.



**Рис. 3.** а, б. Порожниста псевдоморфоза гідроксиду заліза по Fe,Ni-металу, хондрит Грузьке: а – загальне зображення; б – кулясте утворення у КП. Режим відбитих електронів

**Fig. 3.** The hollow pseudomorph of iron hydroxide, which was formed by complete replacement of the Fe-Ni grain, the Gruz'ke chondrite: а – general view, б – spherical object which is located inside the corrosion cavity. Backscattered electron image

З порожнистими ділянками псевдоморфоз пов'язані кулясті (глобулярні) структури ПВ. Так, плоска поверхня зрізу псевдоморфози (Пс) (рис. 3, а, б) містить у середньому (з 3-х ан., межі – у дужках, мас. %): FeO 92,6 (92,1–93,0); NiO 3,5 (2,72–4,02); SiO<sub>2</sub> 3,86 (3,32–4,96); Cl 0,08 (Н. в. – 0,24). За високим вмістом FeO, з його незначними варіаціями, постійними домішками Ni та Si, низьким вмістом Cl вона відповідає гетиту або тонкій суміші  $\alpha$ -FeO(OH) та  $\gamma$ -FeO(OH), що заміщує  $\alpha$ -(Fe,Ni). Кулясте утворення блокової будови, що сформувалося в КП цієї Пс (рис. 3, б), складається з (мас. %): 95,3 FeO, 3,12 NiO, 1,54 SiO<sub>2</sub>, не містить Cl. Збільшений вміст Fe – 80,5 мас. % у глобулі, можливо, пов'язаний із її розташуванням на стінці КП нижче поверхні зразка.

## Висновки

1. Розмаїття структур звітрювання Fe,Ni-металу хондрита Грузьке, наявність заміщених ділянок плямистої, коломорфної, шаруватої будови, зональність продуктів вивітрювання генетично пов'язані з фазовою та хімічною неоднорідністю нікелістого заліза, низьким умістом Ni в  $\alpha$ -(Fe,Ni), що зумовлює пріоритетне окиснення та заміщення камаситу та плеситу порівняно з тенітом.

2. Гідроксиди заліза складаються з дисперсної суміші поширених гетиту та гідроветтиту, не виключено наявність лепідокрокіту. Окиснення метеоритного металу відбувалося за участю вологи, на що вказує безпосередній просторовий зв'язок Fe,Ni-металу з  $\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$ .

3. Суцільно звітрілі зерна Fe,Ni-металу, у яких втрачені первинні структурні та хімічні характеристики, варто обмежено використовувати для інтерпретації доземних процесів утворення речовини цього метеорита.

4. Низький уміст Cl < 0,3 мас. % у ПВ свідчить про їхню низьку корозійну активність, через що буде гальмуватися подальша корозія та заміщення зерен Fe,Ni-металу. Це запобігатиме окисненню речовини метеоритного зразка під час його лабораторного дослідження та зберігання.

## Перспективи подальших досліджень

Перспективність подальшого дослідження визначається необхідністю своєчасного моніторингу продуктів вивітрювання Fe,Ni-металу, як найменш стійкого за земних умов непрозорого мінералу метеоритів. Це дає змогу виявлення і, за необхідності, видалення активного хлорвмісного акаганейту  $\beta$ -FeO(OH,Cl) з метою забезпечення тривалого зберігання метеоритного зразка в лабораторії та музейній колекції ННПМ НАНУ.

*Авторка вдячна В.М. Сливінському (ДУ «ІГНС НАН») та В.В. Пермякову (ІГН НАН) за технічну допомогу під час електронно-мікроскопічного вивчення метеоритного зразка.*

## Література

1. Соботович Э.В., Семенов В.П. Вещество метеоритов. Киев : Наукова думка, 1984. 191 с.
2. Додд Р. Метеориты. Москва : Мир, 1986. 384 с.
3. Соботович Э.В., Семенов В.П. Происхождение метеоритов. Киев : Наукова думка, 1985. 207 с.

## CHEMICAL COMPOSITION AND STRUCTURE OF THE WEATHERING PRODUCTS OF IRON-NICKEL OF THE GRUZ'KE CHONDRITE (H4)

*Shyrinbekova S.N.*

**Shyrinbekova S.N.**, Candidate of Geological Sciences (Ph. D.), M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the National Academy of Sciences of Ukraine, ORCID: 0000-0003-3872-0399, svetlana\_shyrinbekova@ukr.net

*Secondary weathering microstructures such as oxide rims, oxide veins and pseudomorphs of the weathering products are genetically related to altered (weathered) iron-nickel grains (kamacite  $\alpha$ -(Fe,Ni), taenite  $\gamma$ -(Fe,Ni), plessite  $\alpha+\gamma$ -(Fe,Ni)) of the Gruz'ke ordinary chondrite (H4). Rare microglobules of corrosion products were found in the hollow space inside some pseudomorphs. Various weathering microstructures consist of the dispersed mixtures of secondary iron oxyhydroxides – wide-spread goethite  $\alpha$ -FeO(OH) and hydrogoethite  $\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$ . They spread from*

4. Юдин И.А., Коломенский В.Д. Минералогия метеоритов. Свердловск : Урал. НЦ АН СССР, 1987. 200 с.

5. Ширинбекова С.Н. Вплив земного вивітрювання на структурно-мінералогічні особливості метеоритів : дис. ... канд. ; Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України. Київ, 2019.

6. Buchwald V.F., Clarke R.S. Corrosion of Fe-Ni alloys by Cl-containing akaganeite ( $\beta$ -FeOOH): The Antarctic meteorite case. *Amer. Miner.* 1989. Vol. 74. P. 656–667.

7. Структурно-мінералогічні особливості кам'яного метеориту Грузьке / В.П. Семенов та ін. *Мінералогічний збірник Львівського університету*. 2010. № 60. Вип. 1. С. 59–69.

8. Van Schmus W.R., Wood J.A. A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1967. Vol. 31 (5). P. 745–765.

9. Кичань Н. Структури ударного метаморфізму в метеориті Грузьке. *Записки Українського мінералогічного товариства*. 2011. Т. 8. С. 122–125.

10. Wlotzka F. A weathering scale for the ordinary chondrites. *Meteoritics*. 1993. Vol. 28. P. 460.

11. Ширинбекова С.Н. Ознаки звітрювання нікелістого заліза і троїліту хондрита Грузьке (H4). *Мінералогічний журнал*. 2022. Т. 44. Вип. 2. С. 11–19. DOI: 10.15407/mineraljournal.44.02.011.

## References

1. Sobotovich, E.V., Semenenko, V.P. (1984). *Veshchestvo meteoritov*, Nauk. dumka, Kyiv, UA, 191 p.
2. Dodd, R.T. (1986), *Meteorites*, Mir, Moscow, USSR, 384 p.
3. Sobotovich, E.V., Semenenko, V.P. (1985). *Proiskhozhdenie meteoritov*, Nauk. dumka, Kyiv, UA, 207 p.
4. Yudin, I.A., Kolomenskiy, V.D. (1987), *Mineralogiya meteoritov*, Ural. Nauch. Center AN SSSR, Sverdlovsk, USSR, 200 p.
5. Shyrinbekova, S.N. (2019). *Influence of terrestrial weathering on the structural and mineralogical features of meteorites*. (Candidate dissertation). M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NASU, Kyiv.
6. Buchwald, V.F., Clarke, R.S. (1989), Corrosion of Fe-Ni alloys by Cl-containing akaganeite ( $\beta$ -FeOOH): The Antarctic meteorite case, *Amer. Miner.*, 74: 656–667.
7. Semenenko, V.P., Girich, A.L., Kychan, N.V. and Shyrinbekova, S.N. (2010), *Struktorno-mineralohichni osoblivosti kam'ianoho meteoritu Gruz'ke*, *Mineral. zb. Lviv. Univ.*, 60 (1): 59–69, Lviv, UA.
8. Van Schmus, W.R., Wood, J.A. (1967), A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 31 (5): 745–765.
9. Kychan, N. (2011), *Struktury udarnoho metamorfizmu v meteoryti Gruz'ke*, *Zapyski Ukr. Mineral. Tov.*, 8: 122–125.
10. Wlotzka, F. (1993), A weathering scale for the ordinary chondrites, *Meteoritics*, 28: 460.
11. Shyrinbekova, S.N. (2022), Evidences of Weathering of Iron-Nickel and Troilite in the Gruz'ke H4-Type Chondrite, *Mineral. Journ.*, 44 (2): 11–19. DOI: 10.15407/mineraljournal.44.02.011.

the grain boundary into the interior of the metal grains. The presence of lepidocrocite  $\gamma$ -FeO(OH) is assumed. Iron hydroxides are characterized by: a) heterogeneous grey color; b) various structures, the presence of replaced areas of mottled, collomorphic and layered structure; c) porosity and zonal structure; d) variations in the FeO and NiO content. The oxide rim around a large grain of Fe-Ni metal consists of (the average content from 4 an., content limits are given in the brackets, wt. %): FeO 82.7 (81.6–83.8); NiO 10.9 (10.4–11.7);  $SO_3$  4.88 (4.23–5.92); CoO 0.79 (up to 1.31); CuO 0.14 (up to 0.57); MnO 0.14 (up to 0.54); MgO 0.16;  $K_2O + CaO$  0.13; Cl 0.17 (up to 0.26). Iron oxyhydroxide pseudomorph contains (the average of 3 an., limits – in the brackets, wt. %): FeO 92.6 (92.1–93.0); NiO 3.5 (2.72–4.02);  $SiO_2$  3.86 (3.32–4.96); Cl 0.08 (up to 0.24). The phase and chemical heterogeneity of Fe-Ni, low Ni concentration in  $\alpha$ -(Fe,Ni) are the main causes of selective oxidation and replacement of kamacite and plessite, compared to taenite. The process of corrosion and replacement of Fe-Ni metal occurred in the presence of moisture, as evidenced by the direct spatial connection of iron-nickel with FeO(OH) $\cdot$ nH<sub>2</sub>O. Completely altered Fe-Ni grains, which have lost their primary structural and chemical characteristics, are not quite reliable for the interpretation of the pre-terrestrial processes of the meteorite matter formation. Iron hydroxides have a low chlorine content of Cl < 0,3 wt. %, which indicates their low corrosiveness. As a result, further corrosion and replacement of the Fe-Ni metal will be inhibited, which will prevent oxidation of the meteorite sample during laboratory research and storage.

**Key words:** Gruz'ke chondrite, Fe-Ni metal, iron hydroxide, goethite, hydrogoethite, pseudomorph, weathering.