

<https://doi.org/10.15407/mineraljournal.44.02.011>  
УДК 523.681

**С.Н. Ширінбекова**, канд. геол. наук, наук. співроб.

Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України

03142, м. Київ, Україна, пр-т Акад. Палладіна, 34

E-mail: svetlana\_shirinbekova@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0003-3872-0399>

## ОЗНАКИ ЗВІТРЮВАННЯ НІКЕЛИСТОГО ЗАЛІЗА І ТРОЇЛІТУ ХОНДРИТА ГРУЗЬКЕ (Н4)

*Доземні хімічні та структурні характеристики зерен нікелістого заліза (Fe,Ni) і троїліту (FeS) звичайного хондрита Грузьке зазнали змін унаслідок впливу природного земного середовища. Розповсюдження вторинних оксидних жил і оболонок, псевдоморфоз гідроксидів заліза зумовлено пріоритетним вивітрюванням Fe,Ni-металу, головно камаситу  $\alpha$ -(Fe,Ni), меншою мірою плеситу  $(\alpha + \gamma)$ (Fe,Ni) і теніту  $\gamma$ -(Fe,Ni), а також троїліту. Підтверджено просторовий зв'язок між структурами ударного метаморфізму — деформації і нагріву та структурами вивітрювання у метеоритній речовині. Розвиток псевдоморфоз гідроксидів заліза по зернах нікелістого заліза призвів до втрати їхніх доземних структурних особливостей і хімічного складу. Серед продуктів вивітрювання Fe,Ni-металу цього метеорита нами уперше знайдено вторинну високонікелісту фазу, ймовірно, аваруїт ( $Ni_3Fe$ ) або самородний нікель. Низький уміст хлору у корозійних продуктах може свідчити про нетривалий термін знаходження метеорита у ґрунті за відсутності або низької концентрації іонів Cl, через що значно знижується ймовірність утворення агресивної корозійної фази хлорвмісного акаганейту  $\beta$ -FeO(OH,Cl). Це буде запобігати активній корозії метеоритного металу і троїліту та сприяти довготривалому зберіганню метеорита Грузьке під час лабораторного дослідження і в музейній колекції.*

**Ключові слова:** метеорит, хондрит Грузьке, вивітрювання, нікелісте залізо, камасит, теніт, троїліт, гідроксид заліза, аваруїт, самородний нікель.

**Вступ.** Звичайний хондрит Грузьке (Н4, знахідка 2007 р., Кіровоградська обл., Україна) належить до звітрілих метеоритів у метеоритній колекції Національного науково-природничого музею (ННПМ) НАН України. Обставини знахідки метеорита та головні структурно-мінералогічні та хімічні характеристики подано у нашій попередній роботі [5]. Індивідуальний екземпляр метеорита вагою 3,423 кг покриває кора плавлення, бурий колір якої спричинений утворенням поверхневих корозійних продуктів. Ознаки механічного пошкодження у вигляді борозен на поверхні зразка вказують на порушення його цілісності, що сприяє розвитку процесів зві-

ррювання за природних умов. Прожилки гідроксидів заліза розповсюдилися у матриці хондрита. За наявними екзогенними змінами у метеоритній речовині нами визначено приналежність метеорита до стадії вивітрювання W2 [5], згідно зі шкалою вивітрювання звичайних хондритів [19].

Вивчення ступеня земного вивітрювання метеорита Грузьке є першим і необхідним етапом дослідження з метою визначення наукової цінності його речовини для з'ясування доземних фізико-хімічних процесів мінералоутворення в космосі, а також специфіки збереження метеоритних зразків за музейних і лабораторних умов.

Цитування: Ширінбекова С.Н. Ознаки вивітрювання нікелістого заліза і троїліту хондрита Грузьке (Н4). *Мінерал. журн.* 2022. 44, № 2. С. 11—19. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.44.02.011>

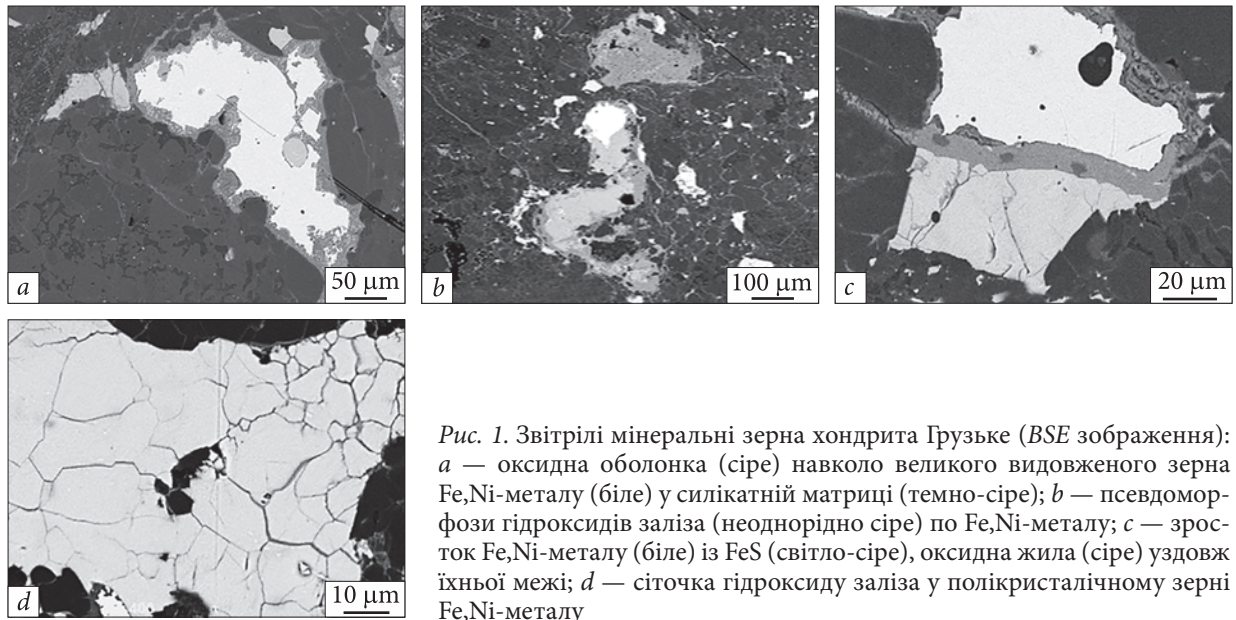


Рис. 1. Звітрілі мінеральні зерна хондрита Грузьке (BSE зображення): *a* — оксидна оболонка (сіре) навколо великого видовженого зерна Fe,Ni-металу (біле) у силікатній матриці (темно-сіре); *b* — псевдоморфози гідроксидів заліза (неоднорідно сіре) по Fe,Ni-металу; *c* — зросток Fe,Ni-металу (біле) із FeS (світло-сіре), оксидна жила (сіре) уздовж їхньої межі; *d* — сіточка гідроксиду заліза у полікристалічному зерні Fe,Ni-металу

Fig. 1. Weathered mineral grains of the Gruz'ke chondrite (BSE images): *a* — oxide rim (grey) around a large elongated Fe-Ni grain (white) in a silicate matrix (dark grey); *b* — iron hydroxide pseudomorphs (inhomogeneous grey) after Fe-Ni; *c* — an oxide vein (grey) developed along the boundary of Fe-Ni (white) and FeS (light grey); *d* — iron hydroxide veinlets (grey) in a polycrystalline grain of Fe-Ni metal

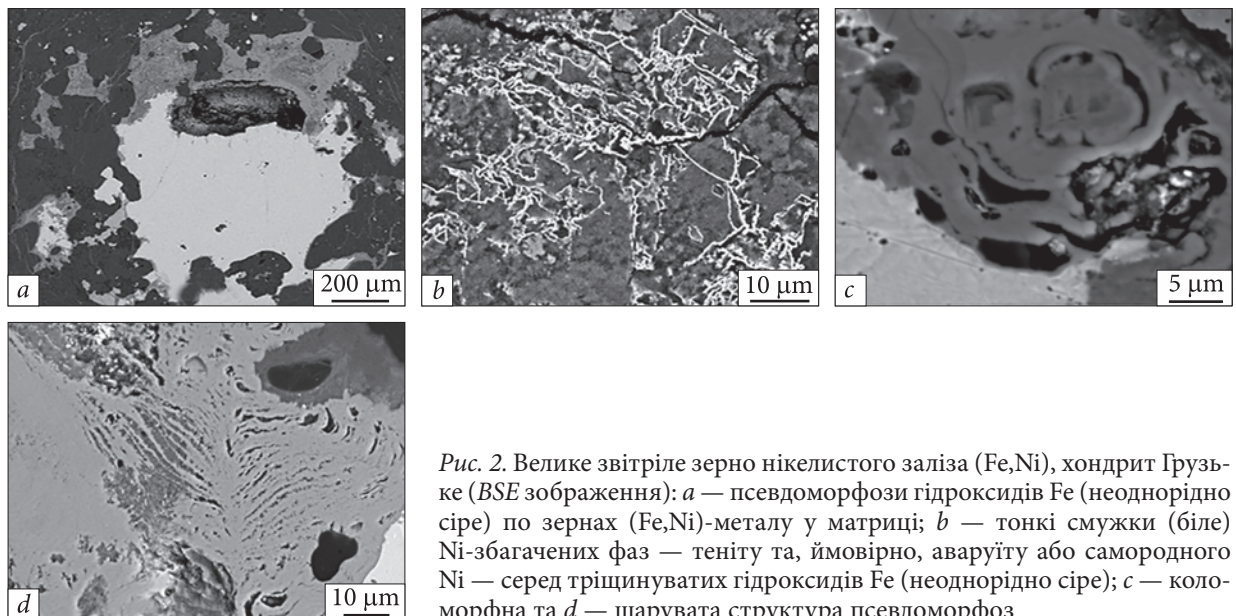


Рис. 2. Велике звітріле зерно нікелістого заліза (Fe,Ni), хондрит Грузьке (BSE зображення): *a* — псевдоморфози гідроксидів Fe (неоднорідно сіре) по зернах (Fe,Ni)-металу у матриці; *b* — тонкі смужки (біле) Ni-збагачених фаз — теніту та, ймовірно, аваруїту або самородного Ni — серед тріщинуватих гідроксидів Fe (неоднорідно сіре); *c* — коломорфна та *d* — шарувата структура псевдоморфоз

Fig. 2. Large weathered Fe-Ni grain of the Gruz'ke chondrite (BSE images): *a* — iron hydroxide pseudomorphs (inhomogeneous grey) after the Fe-Ni grains in the meteorite matrix; *b* — fine bands (white) of Ni-enriched phases of taenite and probably of awaruite or native Ni are among fractured iron hydroxides (inhomogeneous grey); *c* — collomorphic and *d* — layered texture of iron hydroxide pseudomorphs

Оскільки нікелісте залізо і троїліт визначено як найменш стійкі до впливу земного середовища мінерали метеоритів [7, 10, 12], вивчення та моніторинг продуктів їхнього вивітрювання є важливими для виявлення

активних корозійних фаз і їх видалення за необхідності. Це дасть змогу запобігти подальшій корозії і деградації речовини хондрита Грузьке під час проведення лабораторних досліджень та зберігання у метеоритній колекції.



Рис. 3. Звітрілі зерна нікелістого заліза та троїліту хондрита Грузьке (BSE зображення): *a* — зерно теніту, суттєво заміщене на гідроксида заліза; *b* — тонка голчаста будова звітрілої ділянки плеситу; *c* — паралельно-волокниста будова оксидної жили в ударно-метаморфизованому зерні троїліту; *d* — пріоритетна корозія нікелістого заліза (біле, праворуч) уздовж межі з троїлітом (світло-сіре, ліворуч), оксидний прожилок (темно-сіре, посередині) і гідроксид заліза (сіре, праворуч)

Fig. 3. Weathered grains of nickel iron and troilite of the Gruz'ke chondrite (BSE images): *a* — taenite grain is significantly replaced by iron hydroxides; *b* — thin needle structure of the weathered plessite field; *c* — fibrous structure of the oxide vein in the shock-metamorphosed troilite grain; *d* — selective corrosion of Fe-Ni (white, on the right) along the grain boundary with troilite (light grey, on the left), an oxide veinlet (dark grey, in the middle) and iron hydroxide area (grey, right) are between minerals

**Об'єкти і методи.** Структурно-мінералогічні особливості ступеня вивітрювання метеорита Грузьке вивчалися у полірованому шліфі площею  $\sim 2 \text{ cm}^2$  за допомогою поляризаційних мікроскопів ПОЛАМ Р312 та *Nikon ECLIPSE LV100POL* в Інституті геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України, сканувального електронного мікроскопа *JSM-6490 LV (JEOL, Японія)*, обладнаного енергодисперсійним спектрометром (EDS) *INCA Penta FETx3 (Oxford Instruments, Велика Британія)* у ДУ "Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України". За його допомогою проведено вивчення структурних особливостей метеоритного зразка у вторинних (SEI) і зворотно розсіяних електронах (BSE), здійснено послідовне визначення хімічного складу первинних мінералів і корозійних продуктів за прискорювальної напруги 20 кВ, струму зонда 10 нА та діаметра зонда 3 мкм.

**Результати і обговорення.** Зерна нікелістого заліза, представленого камаситом  $\alpha\text{-(Fe,Ni)}$  і тенітом  $\gamma\text{-(Fe,Ni)}$ , їхнім тонким зростанням — плеситом  $(\alpha + \gamma)\text{(Fe,Ni)}$  та троїліту FeS, які здебільшого розташовані у матриці, звітрілися різною мірою. За ступенем виві-

трювання їх поділено на незмінні, мало змінені, помірно та суцільно звітрілі (рис. 1—3). Продукти вивітрювання (Fe,Ni)-металу і троїліту складаються з дисперсної суміші гідроксидів заліза (гетиту-гідрогетиту  $\text{Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH})$ ), що утворюють локальні вторинні структури (рис. 1, *a—d*): *a*) оксидні оболонки; *b*) оксидні прожилки; *в*) псевдоморфози. Для продуктів вивітрювання також характерні численні корозійні пори і тонка зональність. Зональні оксидні оболонки поширилися з периферії більшості зерен (Fe,Ni)-металу, переважно великих амебоподібних зерен камаситу (рис. 1, *a*), меншою мірою — зонального теніту, а також моносульфіду FeS. Оксидні оболонки наявні навколо мінеральних включень у нікелістому залізі. Оксидні прожилки розвинулися по межах кристалів усередині полікристалічних зерен нікелістого заліза і троїліту, по фазових межах у зростках троїліту із нікелістим залізом (рис. 1, *c*), уздовж деформаційних тріщин у зернах FeS. Оксидні прожилки нерідко утворюють сіточку по ударно-метаморфічних структурах полікристалічних зерен (рис. 1, *d*).

Відомо, що звітрювання нікелістого заліза метеоритів відбувається за механізмом елек-

трохімічної корозії, запропонованим В. Бухвальдом і Р. Кларком [12]. За умов вологого помірно-континентального клімату (Fe,Ni) метал заміщується на деякі вторинні мінерали, переважно на оксигідроксиди заліза — гетит  $\alpha$ -FeOOH, гідрогетит  $\text{FeOOH} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , лепідокрокит  $\gamma$ -FeOOH, а також на водний фосфат касидіт  $\text{Ca}_2\text{Ni}(\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , за рахунок звітрювання троїліту утворюються пентландит  $(\text{Fe,Ni})_9\text{S}_8$  і гідроксиди заліза [10].

В одному з великих зерен нікелістого заліза неправильної амебоподібної форми, розміром  $\sim 0,8 \times 1,0$  мм, унаслідок звітрювання утворилися такі структури корозії та заміщення: нерівномірна оксидна оболонка, псевдоморфози гідроксидів заліза на третині площі та велика корозійна порожнина усередині зерна (рис. 2, *a—d*). Незмінений метал, представлений камаситом, складається у середньому з (3 ан., межі у дужках, мас. %): Fe 92,1 (91,5—92,6); Ni 7,03 (6,71—7,41); Co 0,81 (0,0—1,49). У звітрілій речовині уперше виявлено дуже тонкі яскраво-білі смужки та їхні скупчення (розміром до 6,3 мкм), що утворюють складний геометричний рисунок на тлі неоднорідно сірих гідроксидів заліза (рис. 2, *b*). Довжина деяких смужок становить від перших мікрометрів до  $\sim 10,2$  мкм, тоді як їхня ширина  $< 1$  мкм. Склад смужок,

визначений на мікроділянках їхньої щільної концентрації шириною 1,8—4,2 мкм, подано у табл. 1. Зважаючи на розміри смужок, що менші або зіставні з діаметром зонда, наявність О можна пояснити неминучим захопленням його з суміжних продуктів вивітрювання. Незначні розміри білих смужок не дають змогу дослідити їхні структурні характеристики.

За вмістом Ni високонікелісті фази класифіковано на теніт та, імовірно, аваруйт ( $\text{Ni}_3\text{Fe}$ ) або самородний нікель. Визначена нами концентрація Ni у двох аналізах, що становить 71,34 і 72,94 мас. %, відповідає його вмісту в аваруйті, наведеному у літературі [4, 13, 15]; аваруйт нестехіометричного складу з підвищеним вмістом Ni ( $\geq 70$  мас. %) діагностовано у зразках космічної речовини [2, 18] і гірських породах [11]. Відомо, що аваруйт входить до складу залізних і кам'яних метеоритів [4, 10, 15]. Існують різні погляди щодо походження аваруйту в метеоритах: утворення у космічних умовах [2, 15] та у процесі звітрювання у земному середовищі, як продукт екзогенних змін кам'яного і деяких залізних метеоритів [14, 16, 17]. Форма виділень аваруйту у вигляді смужок у речовині метеорита Грузьке схожа на колоїдні смужки та ореоли, які є вторинними морфологічними різнови-

Таблиця 1. Хімічний склад (мас. %) вторинних високонікелістих фаз, знайдених серед продуктів вивітрювання нікелістого заліза хондрита Грузьке  
Table 1. Chemical composition (wt.%) of secondary high-Ni phases, occurred in weathering products of Fe-Ni metal of the Gruz'ke chondrite

Елемент	Високонікелісті фази				
	Середнє (6)	Межі	Компонент	Середнє (6)	Межі
Fe	19,92	10,46—35,55	FeO	24,14	12,39—44,2
Ni	61,80	42,18—72,94	NiO	73,17	51,77—85,11
Co	0,35	Н. в.—0,58	CoO	0,42	Н. в.—0,72
Cr*	0,03	Н. в.—0,20	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05	Н. в.—0,29
Si	0,04	Н. в.—0,26	SiO <sub>2</sub>	0,10	Н. в.—0,49
S	0,83	0,54—1,27	SO <sub>3</sub>	1,91	1,21—3,03
Na*	0,19	Н. в.—1,14	Na <sub>2</sub> O	0,22	Н. в.—1,32
Cl	0,03	Н. в.—0,17	Cl	0,03	Н. в.—0,15
O	16,81	20,22			

Примітка. Середнє (6) — середнє значення вмісту, у дужках подано кількість аналізів. Н. в. — елемент / компонент не виявлено. \* Cr і Na (є забрудненням) виявлено в поодиноких аналізах.

Note. The average (6) — the number of analyses is given in brackets. Н. в. — the element / component is not detected. \* Cr and Na (as contamination) are rare occurred.

дами, що виникли під час звітрювання навколо більш корозійностійких фаз залізних метеоритів [14, 17]. Вторинні високонікелісті металеві фази з вмістом 75—89 ат. % Ni, що становлять аваруйт або самородний нікель, знайдено дослідниками у вигляді тонких оболонок поряд з дрібними кристалами рабдиту серед Fe<sup>3+</sup>-гідроксидів двох метеоритів — залізного Мораско (IAB) і хондрита Пултуск (H5) [16]. За морфологією і розмірами, схожим складом тонкі білі смужки у продуктах вивітрювання нікелістого заліза метеорита Грузьке подібні до вторинних високонікелістих фаз обох метеоритів. На основі цього нами зроблено припущення про можливу відповідність смужок аваруйту або самородному нікелю.

У зв'язку з різною корозійною стійкістю заліза та нікелю [3, 6], низьку концентрацію Fe у високонікелістих фазах пояснюємо вибірковою окисненням заліза, частковим вилученням його з Fe,Ni-металу та утворенням гідроксидів Fe у результаті корозії метеорита у ґрунті. Водночас залишковий метал збагатився нікелем, подібно до схеми, наведеної у роботі [13], відбувалася концентрація ніке-

лю з можливим утворенням смужок аваруйту або самородного Ni на заміщених ділянках металевого зерна.

Звітрілі ділянки, які вміщують Ni-збагачені металеві фази (рис. 2, *b*), відмінні за хімічним складом (табл. 2, стовпчик I). Гідроксид заліза зі зниженим вмістом NiO утворився унаслідок заміщення плеситу, гідроксид заліза з підвищеним NiO є продуктом заміщення теніту. На підставі значних варіацій вмісту FeO і NiO у продуктах вивітрювання припускаємо, що велике зерно Fe,Ni-металу у зразку метеорита Грузьке становить зросток камаситу і теніту, які звітрілися по-різному. Домінуючий камасит зазнав корозійних змін з країв, тоді як теніт, у якому, очевидно, міститься плесит, псевдоморфно заміщений на гідроксиди заліза.

Виявлено характерну коломорфну (рис. 2, *c*) та складну шарувату, звивисту (рис. 2, *d*) вторинні структури продуктів вивітрювання великого металевого зерна. Коломорфний гідроксид заліза характеризується тонкою концентрично-зональною будовою; він утворився внаслідок заміщення  $\alpha$ -(Fe,Ni) фази (табл. 2, стовп. II). Наявне у ньому реліктове

Таблиця 2. Хімічний склад (мас. %) неоднорідно сірих гідроксидів заліза (I), коломорфного (II) і шаруватого гідроксиду заліза (III) у звітрілому великому зерні нікелістого заліза хондрита Грузьке  
Table 2. Chemical composition (wt.%) of the iron hydroxides: of inhomogeneous grey phases (I), of collomorphic (II) and of layered texture (III) within weathered large grain of Fe-Ni metal of the Gruz'ke chondrite

Компонент	I	I	II	II	II	III	III
	Межі	Середнє (7)	1	2	Середнє (2)	Межі	Середнє (10)
FeO	45,69—75,31	62,36	85,71	82,78	84,25	58,62—88,14	82,64
NiO	20,52—47,45	32,89	9,66	10,62	10,14	7,97—33,33	13,94
CoO	Н. в.—1,47	0,79	3,51	1,10	2,31	Н. в.—1,42	0,46
CuO*	Н. в.—0,50	0,07	Н. в.	Н. в.	Н. а.	Н. в.—1,05	Н. а.
SiO <sub>2</sub>	Н. в.	Н. а.	Н. в.	3,86	1,93	Н. в.—1,16	0,25
SO <sub>3</sub>	2,35—6,64	3,33	1,12	1,64	1,38	0,97—2,77	1,65
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Н. в.—0,71	0,19	Н. в.	Н. в.	Н. а.	Н. в.—1,84	0,31
Na <sub>2</sub> O	Н. в.—1,02	0,15	Н. в.	Н. в.	Н. а.	Н. в.—1,3	0,35
K <sub>2</sub> O	Н. в.—0,21	0,03	Н. в.	Н. в.	Н. а.	Н. в.	Н. а.
CaO	Н. в.—0,41	0,09	Н. в.	Н. в.	Н. а.	Н. в.—0,63	0,10
MgO*	Н. в.	Н. а.	Н. в.	Н. в.	Н. а.	Н. в.—0,67	Н. а.
Cl	Н. в.—0,24	0,10	Н. в.	Н. в.	Н. а.	Н. в.—0,85	0,14

Примітка. Середнє (7/2/10) — у дужках подано кількість аналізів. Н. в. — не виявлено. Н. а. — не аналізували. \* CuO і MgO виявлено в поодиноких аналізах.

Note. The average (7/2/10) — the number of analyses is given in brackets. Н. в. — not detected. Н. а. — not analyzed. \* CuO and MgO are rare occurred.

нікелісте залізо за хімічним складом (мас. %): 72,7 Fe, 8,51 Ni, 0,90 Si — відповідає камаситу. Шаруватий гідроксид заліза (рис. 2, *d*) складається з тонких звивистих смужок суб-і мікрометрової ширини, довжиною у десятки мікрометрів; суттєвий діапазон концентрації FeO і NiO (табл. 2, стовп. III) у ньому пов'язаний із окисненням здебільшого камаситу, меншою мірою плеситу і теніту.

Постійну домішку S у продуктах вивітрювання пов'язуємо зі схемою, запропонованою І.О. Юдіним та В.Д. Коломенським [10], на думку яких окиснення метеоритного заліза відбувалось із привнесенням сірки. Під час розкладання троїліту утворюється розчин сірчаної кислоти, що просувається у метеоритах шляхом дифузії уздовж мікротріщин по ультра- і мікропорах.

Концентрично-зональну будову суттєво звітрілих зональних зерен теніту (рис. 3, *a*) зумовлено заміщенням їх на гідроксиди заліза з периферії усередину [2, 5, 7]. Дегідратація вторинних мінеральних фаз спричинила розповсюджену тріщинуватість звітрілих ділянок. На периферії та зсередини середніх-великих металевих зерен унаслідок вибіркового звітрювання  $\alpha$ -(Fe,Ni) фази проявилася тонка гол-

часта будова плеситових ділянок (рис. 3, *b*), розмір деяких голочок становить перші мікрометри. Припускаємо її утворення унаслідок заміщення грубоструктурного плеситу (плеситу типу II, найімовірніше, мартенситу). Деякі звітрілі зсередини зерна становлять собою зональні оксидні оболонки навколо корозійних порожнин. Нікелісте залізо переважно звітрілося уздовж межі із включеннями силікатних зерен (олівіну, піроксену).

Зерна троїліту окиснилися зсередини уздовж тріщин, пластинок деформації та кристалічних меж у полікристалах. В ударно-метаморфізованому зерні троїліту виявлено паралельно-волокнисту будову оксидної жили, складеної, імовірно, з гетиту або лепідокрокіту (рис. 3, *c*) [9]. У зростках троїліту із нікелістим залізом відбулося пріоритетне звітрювання (Fe,Ni)-металу вздовж межі із моносольфідом, а також проникнення продуктів вивітрювання усередину троїліту по ударно-метаморфічних структурах, що спостерігалось у зростках FeS з периферійними ділянками великого металевого зерна (рис. 2, *a*, унизу ліворуч, 3, *d*). Визначення хімічного складу зростка камаситу і моносольфідів та продуктів вивітрювання (рис. 3, *d*, табл. 3),

Таблиця 3. Хімічний склад (мас. %) оксидного прожилку (I) та гідроксиду заліза (II), що кородував камасит, у зростку камаситу та троїліту, хондрит Грузьке

Table 3. Chemical composition (wt.%) of an oxide veinlet (I) and iron hydroxide area (II) that corroded kamacite in the kamacite — troilite aggregate of the Gruz'ke chondrite

Елемент	I		II		Компонент	I		II	
	Середнє (4)	Межі	Середнє (4)	Межі		Середнє (4)	Межі	Середнє (4)	Межі
Fe	57,49	56,31—58,30	66,93	65,10—69,62	FeO	92,44	91,30—93,34	93,08	92,66—93,72
Ni	1,96	1,08—2,83	4,11	3,30—4,64	NiO	3,16	1,80—4,46	5,67	4,75—6,38
Co	0,16	Н. в.—0,65	0,29	Н. в.—0,62	CoO	0,27	Н. в.—1,07	0,38	Н. в.—0,81
Cu	0,10	Н. в.—0,38	Н. а.	Н. в.	CuO	0,15	Н. в.—0,60	Н. а.	Н. в.
Mn	0,09	Н. в.—0,36	Н. а.	Н. в.	MnO	0,15	Н. в.—0,60	Н. а.	Н. в.
Si	0,33	Н. в.—0,53	Н. а.	Н. в.	SiO <sub>2</sub>	0,94	Н. в.—1,52	Н. а.	Н. в.
S	0,69	0,47—0,96	0,25	Н. в.—0,44	SO <sub>3</sub>	2,24	1,53—3,10	0,71	Н. в.—1,26
Al	0,15	Н. в.—0,29	Н. а.	Н. в.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,37	Н. в.—0,75	Н. а.	Н. в.
Mg	0,12	Н. в.—0,47	Н. а.	Н. в.	MgO	0,28	Н. в.—1,10	Н. а.	Н. в.
Ca	Н. а.	Н. в.	0,04	Н. в.—0,14	CaO	Н. а.	Н. в.	0,05	Н. в.—0,21
Cl	Н. а.	Н. в.	0,10	Н. в.—0,24	Cl	Н. а.	Н. в.	0,11	Н. в.—0,27
O	38,92	37,41—40,52	28,29	24,98—30,92					

Примітка. Середнє (4) — у дужках подано кількість аналізів. Н. в. — елемент / компонент не виявлено. Н. а. — не аналізували.

Note. The average (4) — the number of analyses is given in brackets. Н. в. — the element / component is not detected. Н. а. — not analyzed.

утворених уздовж фазової межі, показало, що камасит містить у середньому (2 ан., мас. %) 92,5 (91,93 і 93,06) Fe; 6,67 (6,38 і 6,95) Ni; 0,56 (0,0 і 1,12) Co; 0,28 (0,0 і 0,55) S, характеризується малою кількістю домішок. Моносульфід містить у середньому (4 ан., у дужках — межі вмісту, мас. %) 59,0 (57,29—60,34) Fe; 41,0 (39,66—42,71) S, має збільшену концентрацію S та дефіцит Fe, що є характернішим для піротину. Порівняно з Fe,Ni-металом, оксидний прожилок (табл. 3, стовп. I) та гідроксид заліза (табл. 3, стовп. II), що кородував камасит, характеризуються зменшенням середнього вмісту Fe, відповідно, у 1,6 та 1,4 рази; Ni, відповідно, у 3,4 та 1,6 рази. Оксидний прожилок, що простягся у троїліті, містить більше домішок, ніж гідроксид заліза, проте у ньому не виявлено суттєвої концентрації SO<sub>3</sub>, що свідчить про значну корозійну стійкість моносульфиду на цій ділянці зразка.

Більшою мірою звітрилися включення троїліту у суцільно заміщених ділянках металевих зерен.

Ознаки звітрювання також проявилися у силікатній матриці, в якій розвинулися протяжні зональні оксидні жили і прожилки. Звітрювання зразка поширювалося по ударно-метаморфічних структурах, які утворилися у метеоритній речовині внаслідок ударних подій у космічному середовищі. До них належать структури крихкої деформації — тріщини у троїліті, силікатних зернах і в матриці, зсув деформаційних пластинок у троїліті; структури нагріву — полікристалічні зерна (Fe,Ni) металу та моносульфиду, зональний теніт, мікрографічна будова плеситу, включення у нікелістому залізі [5]. Раніше нами спостерігалось поширення корозійних продуктів по ударно-метаморфічних структурах інших звичайних хондритів з метеоритної колекції ННПМ НАН України [1, 7, 8].

**Висновки.** Поверхнєве та проникне вивітрювання речовини звичайного хондрита Грузьке зумовлено особливостями його структури, хімічного і мінерального складу та обставинами земної історії. Головними чинниками вивітрювання метеорита є високий вміст (Fe,Ni)-металу, його фазова і структурна неоднорідність та концентрація Ni у металі, помітний ступінь ударно-метамор-

фічного перетворення речовини, вплив агресивних чинників земного середовища. Підтверджено попередні висновки [7] про таке: а) пріоритетність звітрювання нікелістого заліза, здебільшого фази камаситу, порівняно з тенітом і троїлітом; б) направленість звітрювання нікелістого заліза з периферії усередину зерен та переважне окиснення троїліту уздовж тріщин у зернах; в) просторовий зв'язок між структурами ударного метаморфізму — деформації і нагріву та структурами звітрювання у метеоритній речовині. Серед продуктів вивітрювання нікелістого заліза нами уперше знайдено вторинну високонікелісту фазу, яка за особливостями морфології та хімічного складу відповідає, імовірно, аваруйту або самородному Ni. Припускаємо її утворення у процесі корозії Fe,Ni-металу.

Під час звітрювання відбувалася міграція елементів — винесення Fe із Fe,Ni-металу, привнесення сірки до продуктів вивітрювання. Розвиток псевдоморфоз гідроксидів заліза призвів до деградації і втрати первинних хімічних і структурних характеристик частини зерен нікелістого заліза та троїліту. Це накладає обмеження на використання звітрілих зерен первинних мінералів для інтерпретації доземного етапу еволюції метеоритної речовини. Незважаючи на виявлені структурно-мінералогічні зміни, продукти вивітрювання нікелістого заліза і троїліту майже не містять хлору. Це вказує на низьку ймовірність утворення агресивної корозійної фази Cl-вмісного акаганейту β-FeO(OH,Cl) та може свідчити про нетривалий термін перебування метеорита у ґрунтовому середовищі, що буде запобігати активній корозії Fe,Ni-металу і сприяти довготривалому зберіганню метеоритного зразка під час досліджень і в музейній колекції.

*Авторка висловлює глибоку подяку член-кор. НАН України, професорці, докторці геол.-мін. наук В.П. Семененко (Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України) за наукові консультації та корисні поради й анонімним рецензентам, зауваження яких дали можливість покращити якість статті. Щиро вдячна В.М. Сливінському (ДУ "Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України") за виконання інструментальних досліджень та аналітичних робіт.*

## ЛІТЕРАТУРА

1. Кичань Н., Гіріч А., Ширінбекова С., Сливінський В. Скульптура поверхні відколу метеорита Челябінськ (LL5). *Мінерал. зб.* 2015. № 65, Вип. 2. С. 37—45.
2. Литасов К.Д., Исикава А., Копылова А.Г., Подгорных Н.М., Похиленко Н.П. Минералогия, микроэлементный состав и классификация высоконикелистого атаксита Онелло. *Докл. Акад. наук.* 2019. **485**, № 4. С. 484—487. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524854484-487>
3. Металлы и сплавы. Справоч. Под ред. Ю.П. Солнцева. Санкт-Петербург: НПО Профессионал, Мир и Семья, 2003. 1066 с.
4. Семененко В.П., Гіріч А.Л., Кичань Н.В. Тонкозернистий ксеноліт AL1 у хондриті Allende (CV3): мінералогія та походження. *Допов. НАН України.* 2012. № 8. С. 85—92.
5. Семененко В.П., Гіріч А.Л., Кичань Н.В., Ширінбекова С.Н. Структурно-мінералогічні особливості кам'яного метеорита Грузьке. *Мінерал. зб. Львів. нац. ун-ту ім. Івана Франка.* 2010. № 60, Вип. 1. С. 59—69.
6. Сокол И.Я., Ульянин Е.А., Фельдгандлер Э.Г. и др. Структура и коррозия металлов и сплавов. Атлас. Справоч. изд. Москва: Metallurgy, 1989. 400 с.
7. Ширінбекова С.Н. Вплив земного вивітрювання на структурно-мінералогічні особливості метеоритів: автореф. дис. ... канд. геол. наук. Київ, 2019. 23 с.
8. Ширінбекова С.Н. Порівняльна характеристика ступеня вивітрювання хондритів з метеоритної колекції Національного науково-природничого музею НАН України. *Зап. Укр. мінерал. тов-ва.* 2008. **5**. С. 96—104.
9. Ширінбекова С.Н. Тонкі морфологічні особливості продуктів земного вивітрювання в метеоритах. *Мінерал. журн.* 2016. **38**, № 2. С. 33—45. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.38.02.033>
10. Юдин И.А., Коломенский В.Д. Минералогия метеоритов. Свердловск: Урал. НЦ АН СССР, 1987. 200 с.
11. Ahmed Z., Bevan J.C. Awaruite, iridian awaruite, and a new Ru-Os-Ir-Ni-Fe alloy from the Sakhakot-Qila complex, Malakand Agency, Pakistan. *Mineral. Mag.* 1981. **44**, Iss. 334. P. 225—230. <https://doi.org/10.1180/minmag.1981.044.334.17>
12. Buchwald V.F., Clarke R.S. Corrosion of Fe-Ni alloys by Cl-containing akaganeite ( $\beta$ -FeOOH): The Antarctic meteorite case. *Amer. Mineral.* 1989. **74**. P. 656—667.
13. Davis A.M., Fisher J.B., Allen J.M., Grossman L. Major and Trace Element Abundances in Pentlandite and Awaruite from the Allende Meteorite: A Preliminary Study. *Meteoritics.* 1978. **13**. P. 438.
14. Flemming R.L., McCausland P.J., Kissin S.A., Corcoran P.L., Biesinger M.C., McIntyre N.S., Fuller M.L., Feng R. The unusual Lovina Ataxite: Examination of Meteoritic Microstructures and Terrestrial Weathering by  $\mu$ XRD, Petrography, SEM, INAA and sXRF. *Amer. Geophys. Union*, Spring Meeting, 2009, abstract id. MA11B-05. Bibcode: 2009AGUSMMA11B..05F
15. Holdsworth E., Nichiporuk W., Moore C.B. Composition of coexisting pentlandite and awaruite in the Allende meteorite. *Meteoritics.* 1973. **8**, № 1. P. 45.
16. Karwowski Ł., Gurdziel A. Secondary minerals in Morasko and Pułtusk meteorites. *Вісн. Львів. ун-ту. Сер. фіз.* 2009. Вип. 43. С. 243—248.
17. Pedersen T.P. Schwertmannite and Awaruite as Alteration Products in Iron Meteorites. *Meteor. and Planet. Sci.* 1999. **34**. P. A90.
18. Rubin A.E. Euhedral awaruite in the Allende meteorite: Implications for the origin of awaruite- and magnetite-bearing nodules in CV3 chondrites. *Amer. Mineral.* 1991. **76**. P. 1356—1362.
19. Wlotzka F. A weathering scale for the ordinary chondrites. *Meteoritics.* 1993. **28**. P. 460.

Надійшла 09.06.2021

## REFERENCES

1. Kychan, N., Girich, A., Shyrinbekova, S. and Slyvinskiy, V. (2015), *Mineral. zb.*, No. 65, Vyp. 2, Lviv, UA, pp. 37-45 [in Ukrainian].
2. Litasov, K.D., Ishikawa, A., Kopylova, A.G., Podgornyh, N.M. and Pohilenko, N.P. (2019), *Dokl. Acad. nauk*, Vol. 485, No. 4, RU, pp. 484-487 [in Russian]. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524854484-487>
3. Solntsev, Yu.P. (ed.) (2003), *Metally i splavy*, Spravochnik, NPO Professional, Mir i semiya, St. Petersburg, RU, 1066 p. [in Russian].
4. Semenenko, V.P., Girich, A.L. and Kychan, N.V. (2012), *Dopov. Nats. Akad. Nauk Ukrainy*, No. 8, Kyiv, pp. 85-92 [in Ukrainian].
5. Semenenko, V.P., Girich, A.L., Kychan, N.V. and Shyrinbekova, S.N. (2010), *Mineral. zb.*, No. 60, Vyp. 1, Lviv, UA, pp. 59-69 [in Ukrainian].
6. Sokol, I.Ya., Ul'yanin, E.A., Feldgandler, E.G., et al. (1989), *Struktura i korrozia metallov i splavov: Atlas, Spravochn. izd.*, Metallurgiya publ., Moscow, RU, 400 p. [in Russian].



7. Shyrinbekova, S.N. (2019), *Vplyv zemnoho vyvitryuvannia na structurno-mineralohichni osoblyvosti meteorytiv*, avtoref. dys. kand. geol. nauk, Kyiv, 23 p. [in Ukrainian].
8. Shyrinbekova, S.N. (2008), *Zap. Ukr. Mineral. tov-va*, Vol. 5, Kyiv, pp. 96-104 [in Ukrainian].
9. Shyrinbekova, S.N. (2016), *Mineral. Journ. (Ukraine)*, Vol. 38, No. 2, Kyiv, UA, pp. 33-45 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.38.02.033>
10. Yudin, I.A. and Kolomenskiy, V.D. (1987), *Mineralogiya meteoritov*, Ural. Nauch. Center AN SSSR, Sverdlovsk, RU, 200 p. [in Russian].
11. Ahmed, Z. and Bevan, J.C. (1981), *Mineral. Mag.*, Vol. 44, Iss. 334, pp. 225-230. <https://doi.org/10.1180/minmag.1981.044.334.17>
12. Buchwald, V.F. and Clarke, R.S. (1989), *Amer. Mineral.*, Vol. 74, pp. 656-667.
13. Davis, A.M., Fisher, J.B., Allen, J.M. and Grossman, L. (1978), *Meteoritics*, Vol. 13, p. 438.
14. Flemming, R.L., McCausland, P.J., Kissin, S.A., Corcoran, P.L., Biesinger, M.C., McIntyre, N.S. and Feng, R. (2009), *Amer. Geophys. Union, Spring Meeting*, abstract id. MA11B-05. Bibcode: 2009AGUSMMA11B..05F
15. Holdsworth, E., Nichiporuk, W. and Moore, C.B. (1973), *Meteoritics*, Vol. 8, No. 1, p. 45.
16. Karwowski, Ł. and Gurdziel, A. (2009), *Visnyk Lviv Univ. Ser. Physics*, Iss. 43, UA, pp. 243-248.
17. Pedersen, T.P. (1999), *Meteor. and Planet. Sci.*, Vol. 34, p. A90.
18. Rubin, A.E. (1991), *Amer. Mineral.*, Vol. 76, pp. 1356-1362.
19. Wlotzka, F. (1993), *Meteoritics*, Vol. 28, p. 460.

Received 09.06.2021

S.N. Shyrinbekova, PhD (Geology), Research Fellow

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

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

E-mail: svetlana\_shyrinbekova@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0003-3872-0399>

#### EVIDENCES OF WEATHERING OF IRON-NICKEL AND TROILITE IN THE GRUZ'KE H4-TYPE CHONDRITE

Terrestrial weathering of the Gruz'ke chondrite was investigated by considering its initial chemical, structural, and mineralogical characteristics. The spread of corrosion and degree of alteration were related to the high content of Fe-Ni metal, the phase inhomogeneity and the different concentration of Ni in the metal, as well as, the shock metamorphism features, and the residence time of the meteorite sample in a soil environment. The formation of secondary oxide veins and oxide rims, consisting of iron hydroxide pseudomorphs was caused by the selective corrosion of kamacite  $\alpha$ -(Fe,Ni), compared to taenite  $\gamma$ -(Fe,Ni) and troilite FeS. A spatial relationship between shock metamorphism features, namely areas of plastic deformation, shock heating and weathering of the meteorite matter, has been confirmed. A secondary Ni-enriched phase, which contains 71.34 to 72.94 wt.% Ni, probably corresponds to awaruite ( $\text{Ni}_2\text{Fe}$  to  $\text{Ni}_3\text{Fe}$ ) or native nickel. This phase is described for the first time as corrosion product of Fe-Ni grains in the Gruz'ke chondrite. We assume that this phase was formed during the alteration of Fe-Ni metal. Fe was removed from the meteorite metal during the corrosion process, while sulfur was introduced. The formation of iron hydroxide pseudomorphs caused changes in primary chemical and structural properties of some crystals of nickel-iron metal and troilite. Thus, the use of weathered mineral grains to interpret the pre-terrestrial conditions of the chondrite matter formation and evolution is limited. In spite of the changes in chemical and mineral composition, the corrosion products of nickel iron and troilite have consistent low chlorine content. Therefore we assume that the akaganeite  $\beta$ -FeO(OH,Cl) phase is unlikely to form. It will prevent further alteration of the Fe-Ni metal and ensure long-term storage and preservation of the meteorite sample for further laboratory research and storage in the museum collection.

**Keywords:** meteorite, Gruz'ke chondrite, weathering, nickel iron, kamacite, taenite, troilite, iron hydroxide, awaruite, native nickel.