

УДК 523.681

ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУР УДАРНОГО МЕТАМОРФІЗМУ ТА ЗВІТРЮВАННЯ МЕТЕОРИТА *БІЛА ЦЕРКВА*

Н. Кичань, С. Ширінбекова

*ДУ “Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України”,
просп. акад. Палладіна, 34а, 03680 Київ-142, Україна
E-mail: cosmin@i.ua*

Наведено результати оптично-мікроскопічного та сканувального електронно-мікроскопічного вивчення хондрита *Біла Церква*. Вперше в метеориті діагностовано мериліт, хлор-апатит, іоцит та локальні структури ударного нагрівання та плавлення. Незначні екзогенні зміни хондрита зумовлені не стільки високим вмістом зерен нікелістого заліза, скільки їхніми морфологічними особливостями, передусім будовою та розміром. Найбільше заміщені середні та дрібні зерна зонального теніту й камаситу.

Ключові слова: метеорит, хондрит, нікелісте залізо, іоцит, хлор-апатит, мериліт, ударний метаморфізм, продукти земного звітрювання, гідроксиди заліза.

Одним із українських метеоритів, що зберігається в метеоритній колекції Національного науково-природничого музею НАН України [2], є рівноважний хондрит *Біла Церква*. Цей метеорит упав 15 січня 1796 р. поблизу села Блощинці, що тепер у Білоцерківському р-ні Київської обл. Його початкова маса була 9,2 кг, проте збереглося лише 1,826 кг. Незважаючи на те, що метеорит *Біла Церква* є другим за часом падіння з сорока чотирьох українських метеоритів у колекції Комітету з метеоритів НАН України, він один з малодосліджених. Мінеральний склад метеорита [3] представлений олівіном, ортопіроксеном, клінопіроксеном, плагіоклазом, нікелістим залізом, троїлітом, хромітом, самородною міддю, магнезіоферитом та когенітом (?). Кількісний склад хондриту такий, об. %: силікатів – 87,4, нікелістого заліза – 7,6, троїліту – 3,3, плагіоклазу – 1,4, хроміту – 0,3. Будова метеорита нерівномірнотзерниста, текстура – реліктова хондритова. Хондри головно повнокристалічної, мікропорфірової, ексцентрично-променевої, колосникової та розкристалізованої скляної структури. Непрозорі мінерали представлені нікелістим залізом, троїлітом і хромітом. Зерна металу й троїліту розташовані переважно в матриці метеорита, іноді всередині хондр. Окремі зерна хроміту діагностовано у матриці та зростках з металом і троїлітом.

Метеорит класифіковано як звичайний хондрит хімічної групи Н та петрологічного типу 6, з незначними ознаками звітрювання, які відповідають стадії W1 [6]. Проте, згідно з дослідженнями В. Семененко зі співавт. [3], метеорит належить до хондритів п'ятого петрологічного типу.

Структурно-мінералогічні особливості метеорита досліджено в шліфах площею 1 см² та двох аншліфах площею 0,8 см². Для цього використано оптичний мікроскоп марки ПОЛАМ-Р321 та електронний мікроскоп марки JEOL JSM 6490LV. У процесі дослідження на сканувальному електронному мікроскопі (СЕМ) використовували напругу

20 кВ. Хімічний склад мінералів та продуктів звітрювання в аншлифах досліджено за допомогою енергодисперсійного спектрометра марки Penta FETx3 Oxford Instruments, яким обладнано СЕМ.

За допомогою сучасного електронного мікроскопа ми провели додаткові структурно-мінералогічні дослідження метеорита, завдяки чому знайдено три акцесорні мінерали: мериліт, хлор-апатит та іюцит. Усі вони розташовані в матриці метеорита. Мериліт та хлор-апатит мають амебоподібну форму зерен розміром 50–200 мкм та містять незначні домішки Mg, Na та Fe (табл. 1). Хімічний склад стабільний у межах зерен та в незначних межах коливається від зерна до зерна. Іюцит, як і в хондриті *Галків* [1], наявний у матриці у вигляді комірчасто-сітчастої структури (рис. 1).

Таблиця 1

Хімічний склад фосфатів у хондриті *Біла Церква*, мас. %

Компонент	Мериліт (11 аналізів)		Хлор-апатит (10 аналізів)	
	межі	середнє	межі	середнє
CaO	43,20–44,80	44,00	49,50–50,60	50,10
P ₂ O ₅	48,50–49,90	49,30	42,30–44,20	43,30
MgO	3,12–3,52	3,30	0,0–0,24	0,04
Na ₂ O	2,35–3,01	2,64	0,0–0,58	0,36
FeO	0,44–1,52	0,73	0,0–2,67	0,60
Cl	Не визначено	Не визначено	5,11–5,54	5,33
Сума		99,97		99,73

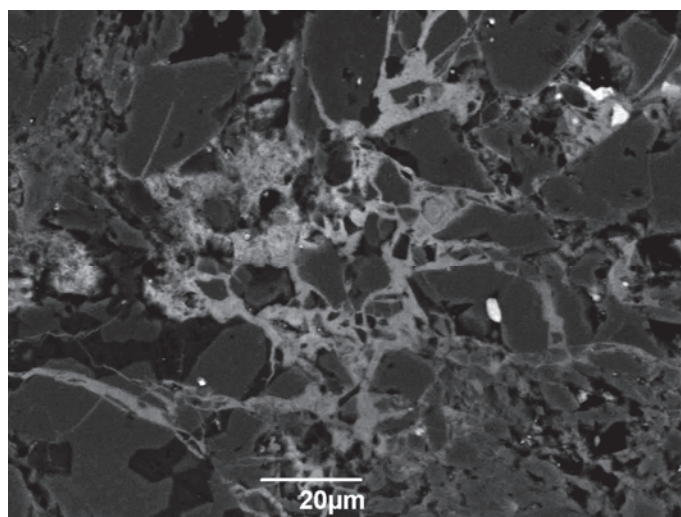


Рис. 1. СЕМ-зображення комірчасто-сітчастої структури іюциту (сіре) у силікатній матриці (темно-сіре).

Дослідження нікелістого заліза за допомогою електронного мікроскопа в аншлифах та визначення його складу дали нам змогу детальніше класифікувати зерна металу за формою, хімічним складом та оцінити силу впливу ударного метаморфізму на хондрит *Біла Церква*, а також ступінь його земного звітрювання. У метеориті наявні три типи зерен металу [5]. До першого належать зерна неправильної амебоподібної форми розмі-

ром від 250 до 650 мкм, до другого – ізометричні зерна розміром від 100 до 250 мкм, третій тип представлений округлими частинками розміром до 100 мкм. Найбільше поширені в хондриті зерна неправильної форми, деякі з гострими краями. Нікелисте залізо представлене камаситом, тенітом, тонко- і грубоструктурним плеситом. Більші за розміром зерна переважно складені камаситом або його зростками з тенітом, а менші – зональним тенітом, інколи грубоструктурним плеситом. Теніт наявний у вигляді окремих зерен і зростків з камаситом. Будова камаситу головно монокристалічна, деякі зерна полікристалічні, теніту – полізональна, а плеситу – тонко- і грубоструктурна (мікрографічна). Кількість зон у теніті змінюється від двох (серцевина плеситу з оболонкою Ni-збагаченого теніту) до трьох (серцевина мікрографічного плеситу, зона плеситу типу IV, оболонка Ni-збагаченого теніту). Центральна частина багатьох зерен теніту має мікрографічну будову, по камаситовій складовій якої розвинувся вторинний троїліт (рис. 2). Троїліт наявний у вигляді окремих зерен неправильної форми та у зростках з нікелистим залізом, структура зерен монокристалічна. Деякі зерна металу й сульфїду містять включення силікатів.

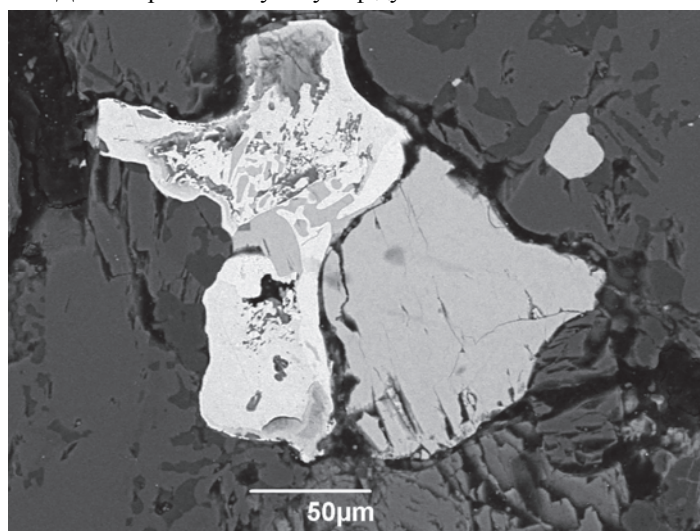


Рис. 2. СЕМ-зображення зростка зерна теніту (біле), який містить мікрографічний плесит, з троїлітом (сіре). Значна частина камаситових ділянок у плеситі сульфїдизована внаслідок ударного нагрівання і складена троїлітом. Темно-сіре – силікати.

Для камаситу метеорита *Біла Церква* характерна варіація вмісту Ni від зерна до зерна та рівномірний склад у межах зерен (табл. 2). Вміст Ni в теніті коливається від 31,3 до 52,7 мас. %. Троїліт також має однорідний хімічний склад, містить невелику кількість домішок Ni ($\leq 1,0$ мас. %) у деяких зернах, що свідчить про їхнє вторинне походження (табл. 2). Каркас комірчасто-сітчастих структур складений не нікелистим залізом чи троїлітом, а іюцитом, який утворився внаслідок ударного метаморфізму. Середній хімічний склад іюциту за даними вимірювання восьми точок становить, мас. %: FeO – 92,7, NiO – 4,34, SO₃ – 2,96. Попередні дослідження [2] свідчать про незначний вплив ударного метаморфізму на первинні структурно-мінералогічні характеристики хондриту. Визначено ударний тиск < 15 ГПа, що за міжнародною шкалою Д. Штоффлера зі співавт. [8] відповідає стадії S2.

Таблиця 2

Хімічний склад нікелістого заліза і троїліту в хондриті *Біла Церква*, мас. %

Компонент	Камасит (65 аналізів)		Теніт (17 аналізів)		Троїліт (38 аналізів)	
	межі	середнє	межі	середнє	межі	середнє
Fe	91,50–93,60	92,60	47,40–68,10	62,30	52,00–60,30	58,80
S	Не визначено	Не визначено	Не визначено	Не визначено	39,60–42,10	40,60
Co	0,40–1,48	0,94	0,00–0,81	0,42	Не визначено	Не визначено
Ni	5,53–7,30	6,40	31,30–52,70	37,30	0,00–0,95	0,34
Сума		99,94		100,02		99,40

Ударний метаморфізм у досліджених аншліфах метеорита *Біла Церква* представлений структурами крихких і пластичних деформацій (тріщинуватість мінералів, хвилясте загасання олівіну), ударного нагрівання (полікристалічні камасит і троїліт, зональний теніт, мікрографічний плесит, включення в камаситі, вторинний троїліт, амебоподібна форма зерен камаситу), а також структурами плавлення (пилоподібні та сітчасті структури троїліту, евтектичні структури плавлення троїліту та нікелістого заліза, ділянки плавлення в силікатах).

Процес ударного метаморфізму завжди є досить складним і нерівноважним. Ударний тиск призводить до широкого діапазону фізичних, мінералогічних та хімічних змін у метеориті. Тому, незважаючи на загальний незначний вплив ударного метаморфізму на хондрит, у локальних ділянках знайдено перелічені вище структури плавлення та ударного нагрівання. Такі структури утворюються внаслідок проходження ударної хвилі через материнське тіло метеорита. Ця хвиля спричиняє підвищення температури в деяких ділянках від 988 (температура плавлення троїліту) до 1 455 °С (температура плавлення нікелістого заліза).

Висока проникна здатність розплаву сульфідів заліза призводить до розтікання його по тріщинах у матриці метеорита. Він утворює жилкуваті, сітчасті, а також евтектичні структури плавлення з тенітом (рис. 3). Однією з таких структур є комірчасто-сітчастий іюцит. Він належить до рідкісних акцесорних мінералів звичайних хондритів, де міг утворитися або внаслідок ударного метаморфізму, або в зовнішній частині кори плавлення [7]. З урахуванням знахідки іюциту всередині аншліфа метеорита *Біла Церква*, причому в комірчасто-сітчастих структурах плавлення, можна з впевненістю діагностувати його як продукт ударно-метаморфічного перетворення хондрита.

Наші попередні дослідження засвідчили, що стадію звітрювання метеорита *Біла Церква* класифіковано як W1 [6]. Для цієї стадії характерний розвиток незначних оксидних оболонок навколо зерен нікелістого заліза і троїліту та утворення оксидних жилок у матриці [9]. Відомо, що на сірій поверхні відколу метеорита є бурі плями гідроксидів заліза, прожилки яких пронизують силікатну речовину; гідроксиди Fe розвинуті по периферії більшості зерен нікелістого заліза і троїліту, найбільше зміненим є камасит, тоді як троїліт зазнав найменших змін [3].

Унаслідок досліджень ми з'ясували, що найбільше заміщеними є двофазові зерна нікелістого заліза, які часто утворюють агрегати з троїлітом (рис. 4). Виявлено вибіркочку

спрямованість звітрювання в плеситі, завдяки чому утворюється низькозалістий гідрогетит з домішками нікелю й сірки (табл. 3, див. рис. 4).

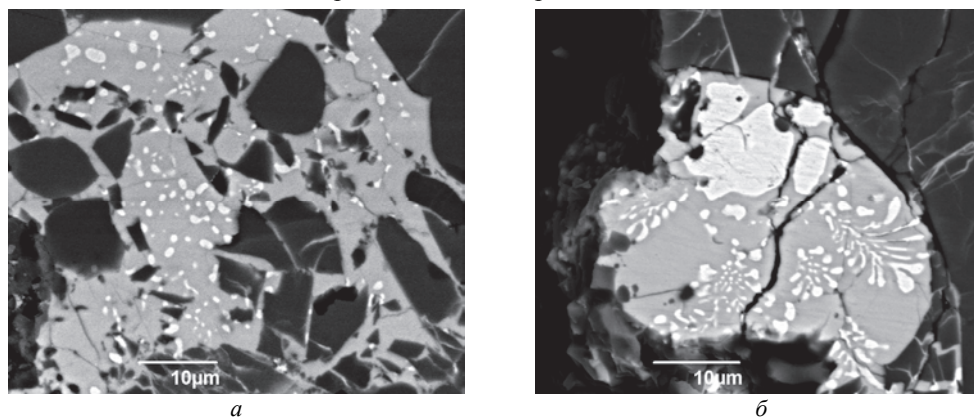


Рис. 3. SEM-зображення евтектичних структур плавлення троїліту (сіре) та нікелістого заліза (біле). Темно-сіре – силікати.

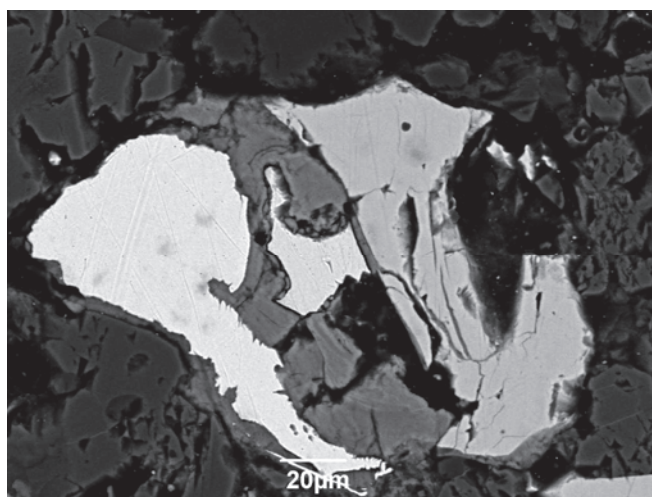


Рис. 4. SEM зображення агрегату селективно заміщеного зерна нікелістого заліза (світле ліворуч), тріщинуватого троїліту (сіре) та центральної зони звітрювання (темно-сіре).

На заміщених ділянках зональних зерен зафіксовано значний вміст Ni (30–40 мас. %), що дає підстави припустити можливість виникнення таких Ni-вмісних оксидів, як треворит і бунзеніт.

Факт підвищеного окиснення металу на контакті з троїлітом можна пояснити двома причинами: 1) ці мінерали утворюють гальванічні пари, у яких метал окиснюється першим; 2) у разі окиснення троїліту з'являється розчин сірчаної кислоти, яка, поширюючись у метеориті дифузійно по мікротріщинах, ультра- і мікропорах, окиснює залізо [7]. Також за аналогією з окисненням земного піротину, який під дією O₂ переходить спочатку в сульфід Fe, згодом у сульфат і насамкінець у гідроксид Fe, утворюється незначна

кількість H_2SO_4 унаслідок окиснення надлишкової сірки [4]. Зважаючи на те, що в троїліті хондрита *Біла Церква* виявлено постійній надлишок сірки (табл. 4, рис. 4), звітрювання троїліту за такою схемою є цілком прийнятним.

Таблиця 3

Хімічний склад металу і продуктів його заміщення з метал-троїлітового агрегату, мас. %

Компонент	Теніт	Камасит	Звітрена зона			Оболонка	Середнє*
	1	2	3	4	5	6	
Fe	67,20	94,70	43,20	44,10	46,40	46,50	44,60
FeO			74,30	86,10	85,40	81,70	81,90
Ni	31,50	5,31	8,21	2,35	2,27	2,73	4,30
NiO			14,20	4,67	4,25	4,85	7,72
Co	0,61	0	0	0,67	0	0,42	Не визначали
CoO				1,30		0,73	
S	0	0	1,97	1,59	2,53	2,91	2,03
SO ₃			6,94	6,46	9,61	10,50	7,67

*Середній хімічний склад за аналізами 3–6.

Таблиця 4

Хімічний склад тріщинуватого зерна троїліту з метал-троїлітового агрегату і гідроксидних прожилків у ньому, мас. %

Компонент	Троїліт				Гідроксидна жилка		
	1	2	3	середнє	4	5	середнє
Fe	57,20	57,20	58,30	57,60	43,00	46,20	44,60
FeO					60,70	58,50	59,60
S	42,80	42,40	41,70	42,30	12,10	14,50	13,30
SO ₃					33,40	35,70	34,60
Ni	0	0	0	0	3,62	3,88	3,75
NiO					5,08	4,86	5,00

Проте зерна троїліту як з метал-троїлітових агрегатів, так і самостійні (неасоційовані) слабо окиснені, лише по тріщинах розвинені тонкі жилки гідроксидів заліза, а периферія майже не змінена. Отже, питання джерела сірки потребує подальшого вивчення.

Навколо великих і середніх мономінеральних зерен камаситу утворилися зональні гідроксидні оболонки, складені неоднорідними сумішами гетиту-гідрогетиту змінного складу з низьким (< 60 %) і високим (> 60 %) вмістом Fe. Крім зонально змінених металевих зерен, простежено заміщення середніх та дрібних зерен камаситу по площі (до 90–100 %), подекуди з утворенням у їхньому центрі порожнин. Часто сильно заміщені металеві зерна розташовані поряд з ударно-метаморфізованими ділянками матриці (рис. 5).

Розвинуті в матриці гідроксидні жилки генетично поєднані зі звітряними металевими зернами. Серед хондр різної будови прожилки гідроксидів Fe проникають переважно в тріщинуваті сірі слабо розкристалізовані та променеві хондри.

Загалом для гідроксидів заліза гетит-гідрогетитового складу характерні значні варіації вмісту Fe (від 35 до 70 мас. %), постійні домішки Ni, S, кореляція вмісту сірки з хлором, який є одним з активних окисників метеоритного заліза [7].

Ми діагностували три акцесорні мінерали та дослідили численні локальні структури ударного метаморфізму: прожилки та евтектичні структури плавлення троїліту і нікелістого заліза, ідіоморфні зерна хроміту в ударних ділянках нормативного плагіоклазу (рис. 6), комірчасто-сітчасті структури іоциту та включення силікатів у камаситі.

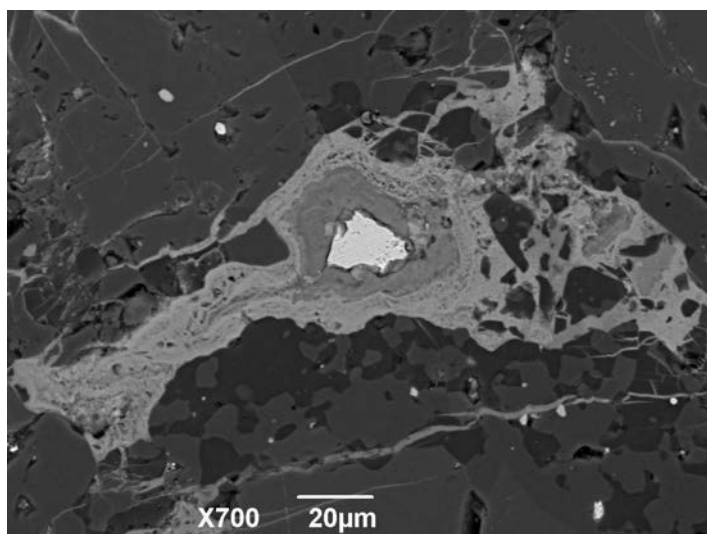


Рис. 5. СЕМ-зображення звітреного на 90 % зерна нікелістого заліза, розташованого поряд з ударно-метаморфізованою ділянкою матриці.

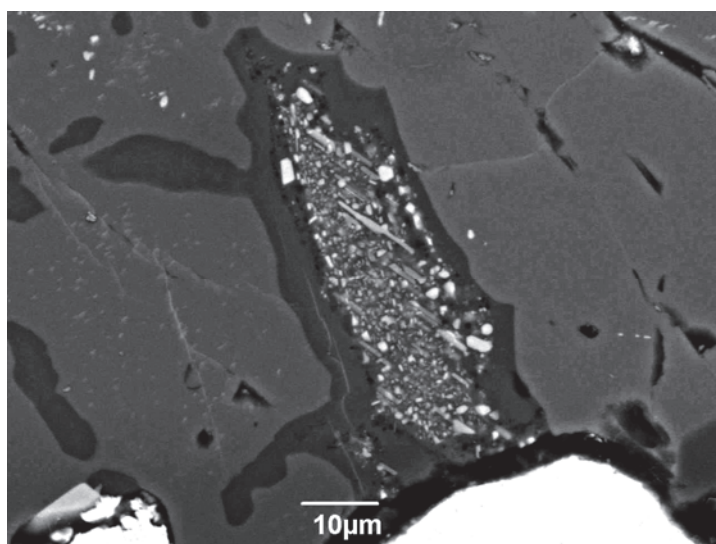


Рис. 6. СЕМ-зображення ідіоморфних кристалів хроміту (сіре) у нормативному плагіоклазі (темно-сіре).

Отже, у деяких локальних ділянках ударна температура сягала температури плавлення нікелістого заліза та троїліту.

Виявлені нами незначні екзогенні зміни хондрита зумовлені не стільки високим вмістом зерен (Fe, Ni), скільки їхніми морфологічними особливостями. Основний чинник звітрювання металу – це будова, а також розмір зерен. Більшого заміщення зазнали середні та дрібні зональні зерна, у яких відбулося селективне звітрювання камаситових

ділянок мікрографічного плеситу, а також дрібні зерна камаситу неправильної форми. Асоціація нікелістого заліза з зернами троїліту сприяє розвитку гідроксидів заліза по металу. Зазначимо, що дослідження одних і тих же взірців хондрита *Біла Церква* впродовж 25 років [3, 6] свідчать про дуже низьку швидкість звітрювання метеорита, який зберігається за лабораторних або музейних умов.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кичань Н. В. Структурно-мінералогічні особливості нікелістого заліза метеорита *Галків* / Н. В. Кичань, С. Н. Ширінбекова, В. М. Сливінський // Зап. Укр. мінерал. т-ва. – 2009. – № 6. – С. 70–76.
2. Семененко В. П. Каталог метеоритів, що зберігаються в Національному науково-природничому музеї НАН України (на 1 січня 2007 р.) / В. П. Семененко, А. Л. Гіріч, Ю. О. Русько // Мінерал. журн. – 2007. – Т. 29, № 2. – С. 72–82.
3. Семененко В. П. Метеориты Украины / В. П. Семененко, Э. В. Собонович, Б. В. Тертычная. – Киев : Наук. думка, 1987. – 220 с.
4. Смирнов С. С. Зона окисления сульфидных месторождений / С. С. Смирнов. – М.; Л. : Изд-во АН СССР, 1955. – 331 с.
5. Собонович Э. В. Вещество метеоритов / Э. В. Собонович, В. П. Семененко – Киев : Наук. думка, 1984. – 191 с.
6. Ширінбекова С. Н. Порівняльна характеристика ступеня вивітрювання хондритів з метеоритної колекції Національного науково-природничого музею НАН України / С. Н. Ширінбекова // Зап. Укр. мінерал. т-ва. – 2008. – № 5. – С. 96–104.
7. Юдин И. А. Минералогия метеоритов / И. А. Юдин, В. Д. Коломенский. – Свердловск : УНТЦ АН СССР, 1987. – 200 с.
8. Stöffler D. Shock metamorphism of ordinary chondrites / D. Stöffler, K. Keil, E. R. D. Scott // *Geochim. Cosmochim. Acta.* – 1991. – Vol. 55. – P. 3845–3867.
9. Wlotzka F. A weathering scale for the ordinary chondrites / F. Wlotzka // *Meteoritics.* – 1993. – Vol. 28. – P. 460.

*Стаття: надійшла до редакції 26.04.2012
прийнята до друку 29.05.2012*

FEATURES OF SHOCK METAMORPHISM STRUCTURES AND WEATHERING OF METEORITE *BILA TSERKVA*

N. Kychan', S. Shyrinbekova

*SI "Institute of Environmental Geochemistry, NAS of Ukraine",
34a, Acad. Palladin Av., 03680 Kyiv-142, Ukraine
E-mail: cosmin@i.ua*

The results of optic microscopic and scanning electron microscopic study of chondrite *Bila Tserkva* are given. Originally the merrillite, chlorine-apatite, iozite and structures of shock heat and melting were discovered in the meteorite. Minor terrestrial changes of the chondrite are caused rather the morphology such as structure and size of the mineral grains than the high content of nickel iron. The grains of medium and small sizes of zonal taenite and kamacite are most weathered.

Key words: meteorite, chondrite, nickel iron, iozite, chlorine-apatite, merrillite, shock metamorphism, products of terrestrial weathering, iron hydroxides.

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУР УДАРНОГО МЕТАМОРФИЗМА И ВЫВЕТРИВАНИЯ МЕТЕОРИТА *БЕЛАЯ ЦЕРКОВЬ*

Н. Кичань, С. Ширинбекова

*ГУ "Институт геохимии окружающей среды НАН Украины",
просп. акад. Палладина, 34а, 03680 Киев-142, Украина
E-mail: cosmin@i.ua*

Приведено результаты оптически микроскопического и сканирующего электронно-микроскопического изучения хондрита *Белая Церковь*. Впервые в метеорите диагностировано мерриллит, хлор-апатит, иоцит и структуры локального ударного нагревания и плавления. Незначительные экзогенные изменения хондрита обусловлены не столько высоким содержанием зерен никелистого железа, сколько их морфологическими особенностями, а именно – строением и размером. Наиболее замещены зерна зонального тэнита и камасита среднего и мелкого размера.

Ключевые слова: метеорит, хондрит, никелистое железо, иоцит, хлор-апатит, мерриллит, ударный метаморфизм, продукты земного выветривания, гидроксиды железа.