

## Термический метаморфизм металлической ассоциации в светлой литологии метеорита Челябинск LL5

Е. В. Брусницына<sup>1</sup>, Р. Ф. Муфтахетдинова<sup>1</sup>, Г. А. Яковлев<sup>1,2</sup>, В. И. Гроховский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, e-mail: [jeka\\_bru@list.ru](mailto:jeka_bru@list.ru)

<sup>2</sup>Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, 620110, г. Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15

Поступила в редакцию 30.12.2023 г., принята к печати 20.02.2024 г.

**Объект исследований.** Металлическая ассоциация в светлой литологии обыкновенного хондрита Челябинск (LL5). **Цель.** Исследование структуры камасита ( $\alpha$ -Fe(Ni, Co)) и тэнита ( $\gamma$ -Fe(Ni, Co)) и выявление морфологических особенностей, возникающих в результате нагрева вещества хондрита. **Материалы и методы.** Образцы из неизменной светлой литологии метеорита Челябинск. Используются методы оптической микроскопии (Zeiss Axiovert 40 MAT) и сканирующей электронной микроскопии (FE-SEM SIGMA VP) с приставкой EDS для определения химического состава. **Результаты.** Исследуемые фрагменты разделены на три группы в зависимости от структурного состава: 1) металлические зерна с неизменной структурой, в тэните наблюдается зональное строение (тетратэнит, облачная зона); 2) металлические зерна со структурой тэнита, похожей на зональную; 3) фрагменты, в которых не обнаружены зерна с зональным строением, присутствуют мартенситоподобные структуры, сформировавшиеся при повторном нагреве. Структура металлической ассоциации в хондрите Челябинск сопоставлена со структурой металлической ассоциации, полученной в ранее проведенных экспериментах по нагреву в лабораторных условиях железного метеорита Сеймчан. Установлено, что при нагреве до температуры 400°C в течение 6 ч изменений в структуре зерен металла не происходит, при нагреве до 500 и 600°C в течение 6 ч начинаются процессы трансформации облачной зоны, полностью она исчезает при нагреве до 700°C в течение 6 ч. **Выводы.** Фрагменты светлой литологии обыкновенного хондрита Челябинск были нагреты неравномерно в результате импактного события в его космической истории. Наличие тетратэнита и облачной зоны в одном из фрагментов говорит о том, что данная область была нагрета не выше 400°C, некоторые области претерпели нагрев в диапазоне температур 500–600°C, а некоторые – были нагреты выше 700°C.

**Ключевые слова:** метеорит Челябинск, хондрит, камасит, тэнит, тетратэнит, облачная зона, плессит

### Источник финансирования

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития УрФУ в соответствии с программой "Приоритет-2030". Е.В. Брусницына благодарит за поддержку Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FEUZ-2023-0014

## Thermal metamorphism of metal assemblage in the light lithology of the Chelyabinsk LL5 meteorite

Evgeniya V. Brusnitsyna<sup>1</sup>, Razilia F. Muftakhetdinova<sup>1</sup>, Grigoriy A. Yakovlev<sup>1,2</sup>, Victor I. Grokhovsky<sup>1</sup>

<sup>1</sup>B.N. Yeltsin Ural Federal University, 19 Mira st., Ekaterinburg 620002, Russia, e-mail: [jeka\\_bru@list.ru](mailto:jeka_bru@list.ru)

<sup>2</sup>A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, 15 Academician Vonsovsky st., Ekaterinburg 620110, Russia

Received 30.12.2023, accepted 20.02.2024

**Research subject.** Metal assemblage in the light lithology of the Chelyabinsk ordinary chondrite (LL5). **Aim.** The study of the structure of kamacite ( $\alpha$ -Fe(Ni, Co)) and taenite ( $\gamma$ -Fe(Ni, Co)), as well as identification of the morphological features resulting from heating of chondrite matter. **Materials and methods.** Samples from the unaltered light lithology of the

**Для цитирования:** Брусницына Е.В., Муфтахетдинова Р.Ф., Яковлев Г.А., Гроховский В.И. (2024) Термический метаморфизм металлической ассоциации в светлой литологии метеорита Челябинск LL5. *Литосфера*, **24**(2), 341–346. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2024-24-2-341-346>

**For citation:** Brusnitsyna E.V., Muftakhetdinova R.F., Yakovlev G.A., Grokhovsky V.I. (2024) Thermal metamorphism of metal assemblage in the light lithology of the Chelyabinsk LL5 meteorite. *Lithosphere (Russia)*, **24**(2), 341–346. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2024-24-2-341-346>

© Е.В. Брусницына, Р.Ф. Муфтахетдинова, Г.А. Яковлев, В.И. Гроховский, 2024

Chelyabinsk meteorite. The chemical composition of the samples was studied using optical microscopy (Zeiss Axiovert 40 MAT) and scanning electron microscopy (FE-SEM ΣIGMA VP) with an EDS unit. *Results.* The studied fragments can be divided into three groups depending on their structural composition: 1) metal grains with an unchanged structure; a zonal structure is observed in taenite (tetrataenite, cloudy zone); 2) metal grains with a taenite structure similar to the zonal one; 3) fragments in which no grains with a zonal structure were found; martensite-like structures formed during reheating were present. The structure of metal assemblage in the Chelyabinsk chondrite is compared with the structure of metal assemblage obtained in previous experiments with the Seymchan iron meteorite. It was established that heating to a temperature of 400°C for 6 h causes no changes in the metal grain structure. Heating to temperatures of 500 and 600°C for 6 h initiates transformation processes of the cloudy zone, which disappears completely after heated to 700°C for 6 h. *Conclusions.* Fragments of the light lithology of the Chelyabinsk ordinary chondrite were heating unevenly as a result of an impact event in its cosmic history. The presence of tetrataenite and a cloudy zone in one of the fragments means that temperature in this area didn't exceed 400°C. Some areas underwent heating in the temperature range of 500–600°C and above 700°C.

**Keywords:** Chelyabinsk meteorite, chondrite, kamacite, taenite, tetrataenite, cloudy zone, plessite

#### Funding information

The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Ural Federal University Program of Development within the Priority-2030 Program). E.V. Brusnitsyna thanks the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for project support No. FEUZ-2023-0014

## ВВЕДЕНИЕ

Метеорит Челябинск LL5 S4 W0 классифицирован как обыкновенный хондрит, вещество которого состоит из нескольких визуально различимых структурных зон – литологий: светлой, темной и ударно-расплавленной (Галимов и др., 2013; Grokhovsky et al., 2014; Badyukov et al., 2015). Зоны светлой литологии окружены зонами темной литологии, все они расположены в пределах импактного расплава. Такие зоны встречаются как в небольших индивидуальных фрагментах, так и сосуществуют в массивных образцах, поднятых со дна оз. Чебаркуль. Подобные зоны свидетельствуют о том, что в космической истории родительского тела происходили ударные события, возможно ставшие причиной частичного или полного изменения исходного вещества. Подробному изучению строения, минерального состава, возраста, геохимических и изотопных характеристик вещества метеорита Челябинск посвящено много работ (Берзин и др., 2013; Галимов и др., 2013; Анфилов и др., 2013; Ханчук и др., 2013; Степанов, Берзин, 2015). На основе экспериментов по ударному нагружению образца из светлой литологии метеорита Челябинск авторы работы (Grokhovsky et al., 2020) предложили модель формирования родительского тела метеороида Челябинск. Также ими установлено, что фрагменты со светлой литологией подверглись незначительным деформациям и нагреву и в большей степени соответствуют исходному веществу родительского тела. Для темной литологии степень термического метаморфизма определяется температурой плавления троилита, но для светлой литологии такие критерии не установлены.

Главными минералами обыкновенных хондритов являются оливин, ортопироксен, плагио-

клез, самородные металлы (сплавы железа и никеля, представленные камаситом  $\alpha$ -Fe(Ni, Co), тэнитом  $\gamma$ -Fe(Ni, Co) и др.), троилит, графит (Маракушев, 1988). Основным индикатором того, что вещество обыкновенного хондрита до падения на Землю не подвергалось тепловому или ударному воздействию, служит наличие в структуре зерен тэнита с зональным строением (Брусницына и др., 2023). Такая структура формируется при чрезвычайно медленном охлаждении, порядка 1 К/млн лет (Yang et al., 1996). По границе зерна тэнита наблюдается светлая каемка тетратэнита (упорядоченная  $\gamma'$ -фаза FeNi). Содержание никеля в тетратэните колеблется от 48 до 50 мас. %. Рядом находится сильно травящаяся наноструктура – облачная зона (cloudy zone), которая состоит из высоконикелевых зерен упорядоченной фазы FeNi (тетратэнита) размером несколько сотен нанометров в матрице камасита. Содержание никеля снижается с удалением от края тетратэнита от 48 до 30 мас. % (Явнель, 1983). Структурные и морфологические особенности зерен тэнита и камасита могут отражать скорости охлаждения родительских тел метеоритов при температурах ниже 500°C. Облачная зона также может выступать в качестве индикатора температуры нагрева вещества до падения на Землю.

Ранее выполненные коллективом авторов эксперименты по нагреву палласита Сеймчан и обыкновенного хондрита Calama 009 показали (Brusnitsyna et al., 2023), что при нагреве при температурах 500 и 600°C начинаются процессы трансформации в структуре облачной зоны, а при нагреве до 700°C эта область полностью исчезает. Таким образом, целью данного исследования выступает изучение морфологических особенностей строения металлической ассоциации и выявление следов термического метаморфизма в светлой литологии метеорита Челябинск.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследований использовалось вещество метеорита Челябинск, собранного метеоритной экспедицией УрФУ. Восемь фрагментов со светлой литологией было отобрано и распилено. Поверхность образцов готовилась по стандартной методике, которая включает шлифовку, полировку и травление. В качестве травителя применялся 4%-й раствор азотной кислоты в спирте. Микроструктурные исследования особенностей металлической ассоциации проводились с помощью оптического инвертированного микроскопа Zeiss Axiovert 40 MAT и электронного микроскопа FE-SEM ΣIGMA VP. Для определения химического состава использовалась приставка EDS.

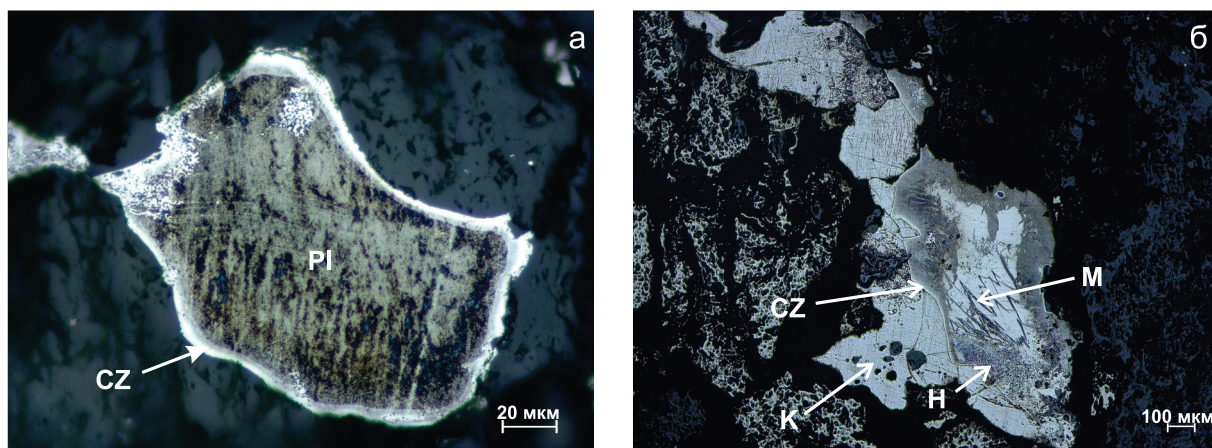
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Минеральный состав металлических зерен светлой литологии метеорита Челябинск характерен для обыкновенных хондритов и представлен камаситом, тэнитом, тетратэнитом и их механической смесью (Badyukov et al., 2015). Однако металлические зерна со структурой зонального тэнита, так называемым М-профилем, практически отсутствуют. После исследования образцов с помощью оптической микроскопии фрагменты были разделены на три группы (А, В и С) в зависимости от структурного состава зерен металла: 1) А1 – фрагмент с неизменной структурой тэнита и камасита; 2) В1 и В2 – фрагменты со структурой тэнита, похожего

на зональный; 3) С1, С2, С3, С4 и С5 – фрагменты, в которых не обнаружены высоконикелевые частицы со структурой зонального тэнита, присутствуют мартенситоподобные структуры.

Микроструктура металлических зерен в фрагменте А1 характерна для обыкновенных хондритов, каких-либо изменений не наблюдается. На рис. 1а представлено зерно тэнита с зональным строением. В данном образце присутствуют зональные высоконикелевые частицы с областями тетратэнита ( $\gamma'$ ) и облачной зоной ( $\gamma' + \alpha$ ). В этом же фрагменте ранее было обнаружено уникальное зерно тэнита (рис. 1б), имеющее зональную структуру и содержащее минерал хаксонит ( $(\text{FeNi})_{23}\text{C}_6$ ). В центральной области данной частицы наблюдалась структура игольчатого мартенсита ( $\alpha_2$ ), которая образуется в земных железоникелевых сплавах в результате термической обработки и содержит углерод (Grokhovsky et al., 2015; Brusnitsyna et al., 2018).

Во фрагментах второй группы присутствуют металлические зерна тэнита, структура которых при исследовании в оптическом микроскопе имеет схожее строение со структурой зонального тэнита (рис. 2а). После травления наблюдаются темная поликристаллическая центральная часть и светлая поликристаллическая каемка. При изучении данных частиц при более высоком разрешении с использованием электронного микроскопа в центральной части была обнаружена мелкозернистая структура плессита ( $\alpha + \gamma$ ) с размером зерна несколько сотен нанометров. Облачная зона в исследуемых частицах отсутствует (рис. 2б). Содержание Ni по кра-



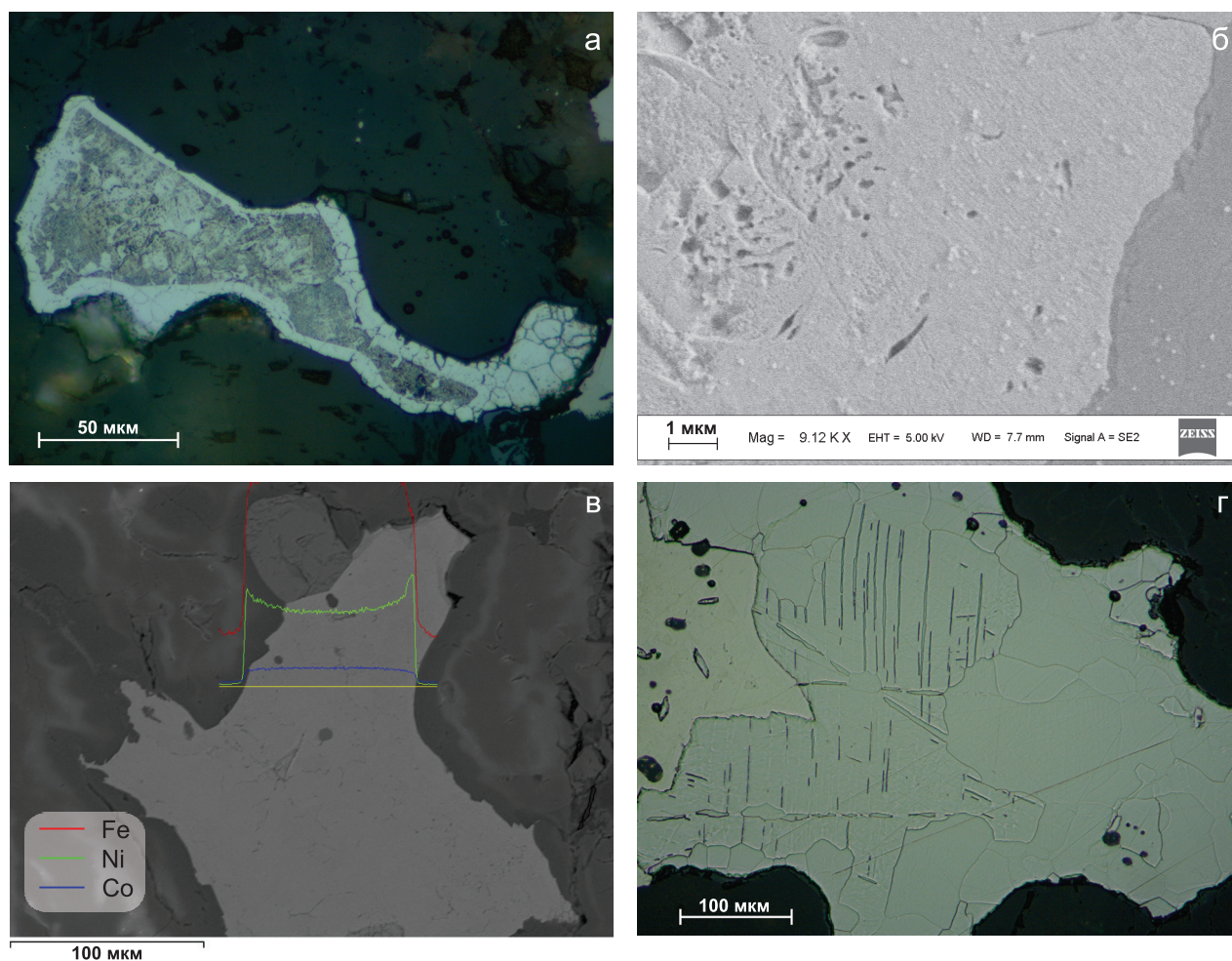
**Рис. 1.** Микроструктура зерен тэнита во фрагменте А1 со светлой литологией метеорита Челябинск.

а – зерно, имеющее строение зонального тэнита, светлая каемка – тетратэнит и облачная зона; б – зерно тэнита в ассоциации с камаситом, внутри которого обнаружен минерал хаксонит, в центральной области – игольчатый мартенсит. CZ – облачная зона, К – камасит, PI – плессит, Н – хаксонит, М – мартенсит.

**Fig. 1.** Microstructure of taenite grains in fragment A1 from the light lithology of the Chelyabinsk meteorite.

а – grain with the structure of zonal taenite, a light rim – tetraetaenite and a cloudy zone; б – grain of taenite in association with kamacite, within which the mineral haxonite was found, in the central region – acicular martensite. CZ – cloudy zone, K – kamacite, PI – plessite, H – haxonite, M – martensite.





**Рис. 2.** Микроструктура фрагментов B1 и B2 светлой литологии метеорита Челябинск.

а – зерно тэнита, имеющее светлую поликристаллическую каемку, схожее с зерном зонального тэнита, фрагмент B2; б – электронная микрофотография, демонстрирующая отсутствие облачной зоны, фрагмент B2; в – линейное картирование, выполненное в зерне тэнита фрагмента B2; г – рост новой фазы с вытянутой столбчатой структурой в зерне камасита во фрагменте B1.

**Fig. 2.** Microstructure of fragments B1 and B2 of light lithology of the Chelyabinsk meteorite.

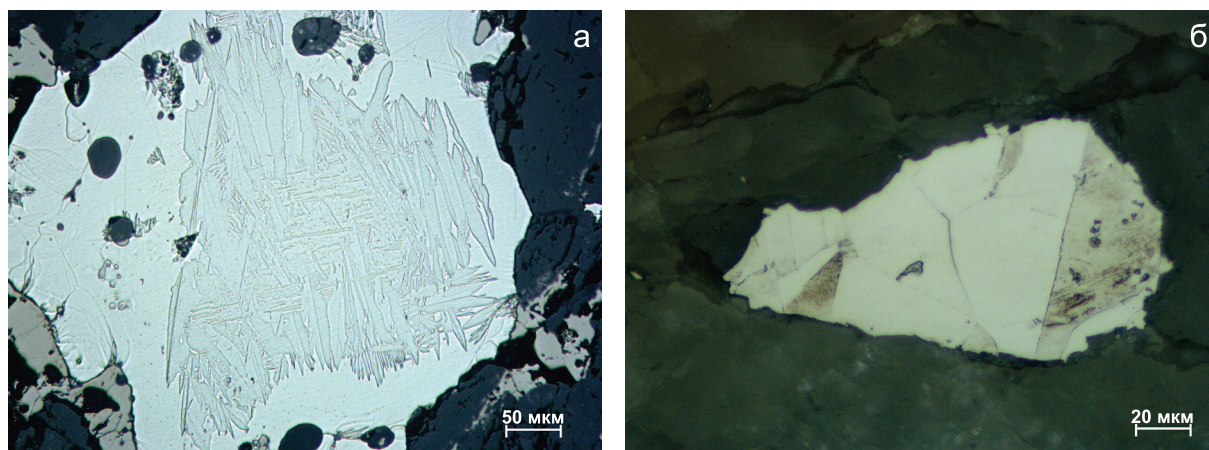
а – a taenite grain with a light polycrystalline rim, similar to a zonal taenite grain, fragment B2; б – electron micrograph showing the absence of cloudy zone, fragment B2; в – linear mapping performed in a taenite grain of fragment B2; г – growth of new phase with an elongated columnar structure in a kamacite grain in fragment B1.

ям изменяется от 45 до 50 мас. %, в центральной части – от 30 до 40 мас. %. Выполнено линейное картирование, которое показало небольшой градиент по Ni (рис. 2в). В зернах камасита фрагмента B1 обнаружены линии Неймана, которые указывают на ударно-индуцированную деформацию камасита. На рис. 2г представлено зерно камасита, в котором наблюдается рост новой фазы с вытянутой столбчатой структурой.

Исследования фрагментов третьей группы с помощью оптической микроскопии не выявили зерен тэнита с зональным строением. Высокониелевые металлические зерна фрагментов этой группы содержат различные по морфологии мартенситопод-

обные структуры, образовавшиеся в результате повторного нагрева (рис. 3а).

Также для всех фрагментов этой группы характерны частицы рекристаллизованного металла со структурой поликристаллического камасита. Кроме того, во фрагменте C5 имеется несколько металлических зерен с двойниками роста в тэните. Содержание Ni в таких однородных зернах тэнита составляет 35–39 мас. %. Двойники роста обычно выглядят как широкие полосы, ограниченные параллельными линиями, связанными с когерентными плоскостями {111}. Иногда эти микромасштабные двойники не связаны с границами зерен. Подобные двойники наблюдаются во многих сплавах с ГЦК-



**Рис. 3.** Термический метаморфизм в зернах тэнита во фрагментах образцов из третьей группы.

а – мартенситоподобная структура в образце C2; б – двойники роста, фрагмент C5.

**Fig. 3.** Thermal metamorphism in taenite grains in fragments of samples from the third group.

а – martensite-like structure in sample C2; б – growth twins, fragment C5.

решеткой, а также в аустенитных сталях после длительного отжига (Шредер, Роуз, 1972).

Сопоставляя результаты исследования фрагментов со светлой литологией метеорита Челябинск с данными, полученными при нагреве палласита Сеймчан и обыкновенного хондрита Calama 009 (Brusnitsyna et al., 2023), можно сделать вывод, что металлическая ассоциация в светлой литологии, как и в темной литологии, подверглась термическому метаморфизму. При воздействии температур 500–600°C начинается рекристаллизация камасита. После отжига при температуре 700°C исчезает облачная зона и формируются мартенситоподобные структуры. Вероятно, и гомогенизация тэнита с образованием двойников может происходить при температурах выше 700°C.

### ВЫВОДЫ

В результате работы проведен структурный анализ вещества метеорита Челябинск со светлой литологией и изучены особенности структуры, связанные с разной степенью нагрева. Фрагменты светлой литологии обыкновенного хондрита Челябинск были нагреты неравномерно в результате импактного события в его космической истории. Наличие тетратэнита и облачной зоны в одном из фрагментов говорит о том, что данная область была нагрета не выше 400°C, что, в свою очередь, свидетельствует о более примитивном (исходном) состоянии исследуемого вещества по сравнению с областями, которые претерпели нагрев в диапазоне температур 500–600°C, а некоторые – были нагреты выше 700°C. Полученный градиент структур можно объяснить массивностью родительского те-

ла метеороида, и разноотдаленностью областей вещества от источника ударного события.

Также проведен сравнительный анализ структур метеорита Челябинск со структурами метеоритов Сеймчан и Calama 009 после экспериментов по нагреву. Полученные данные сопоставимы между собой и свидетельствуют о том, что метеоритное вещество светлой литологии также подверглось термическому и/или ударному воздействию в космическом пространстве.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анфилов В.Н., Белогуб Е.В., Блинов И.А., Еремяшев В.Е., Кабанова Л.Я., Лебедева С.М., Лонцакова Г.Ф., Хворов П.В. (2013) Петрография, минералогия и строение метеорита Челябинск. *Литосфера*, (3), 118-129.
- Берзин С.В., Ерохин Ю.В., Иванов К.С., Хиллер В.В. (2013) Особенности минерального и геохимического состава метеорита Челябинск. *Литосфера*, (3), 89-105.
- Богомолов Е.С., Скублов С.Г., Марин Ю.Б., Степанов С.Ю., Антонов А.В., Галанкина О.Л. (2013) Sm-Nd возраст и геохимия минералов метеорита Челябинск. *Докл. АН*, 452(5), 548-553.
- Брусницына Е.В., Муфтахетдинова Р.Ф., Яковлев Г.А. (2023) Металлографическая оценка степени нагрева внеземного вещества. *Уральская школа молодых металловедов. Сб. ст. конф. XXII Уральской школы-семинара металловедов – молодых ученых*. (Под ред. А.А. Попова). Екатеринбург, Ажур, 152-156.
- Галимов Э.М., Колотов В.П., Назаров М.А., Костицын Ю.А., Кубракова И.В., Кононкова Н.Н., Рощина И.А., Алексеев В.А., Кашкаров Л.Л., Бадюков Д.Д., Севастьянов В.С. (2013) Результаты вещественного анализа метеорита Челябинск. *Геохимия*, 51(7), 580-598.



- Маракушев А.А. (1988) Петрология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 311 с.
- Степанов С.Ю., Берзин С.В. (2015) Микроэлементный состав троилита, железа и никелистого железа метеорита Челябинск. *Литосфера*, (1), 98-108.
- Ханчук А.И., Гроховский В.И., Игнатьев А.В., Веливецкая Т.А., Кияшко С.И. (2013) Первые данные изотопного состава кислорода, углерода и серы метеорита Челябинск. *Докл. АН*, **452**(3), 317-320.
- Шредер А., Роуз А. (1972) Металлография железа. Т. II. Структура сталей (с атласом микрофотографий). Пер. с англ. М.: Металлургия, 478 с.
- Явнель А.А. (1983) Упорядоченная структура FeNi в метеоритах и диаграмма состояния системы железо-никель. *Метеоритика*, **42**, 66-71.
- Badyukov D.D., Raitala J., Kostama P., Ignatiev A.V. (2015) Chelyabinsk Meteorite: Shock Metamorphism, Black Veins and Impact Melt Dikes, and the Hugoniot. *Petrology*, **23**, 103-115.
- Brusnitsyna E.V., Badekha K.A., Grokhovsky V.I., Muftakhetdinova R.F. (2018) Martensite morphology in different types of meteorites. *Meteorit. Planet. Sci.*, **53**(S1), 6290.
- Brusnitsyna E.V., Muftakhetdinova R.F., Yakovlev G.A., Kiryakov A.N. (2023) Structural changes in the metallic particles of the Calama 009 ordinary chondrite after heating. *Meteorit. Planet. Sci.*, **58**(S1), 6251.
- Grokhovsky V.I., Brusnitsyna E.V., Yakovlev G.A. (2015) Haxonite in Chelyabinsk LL5 meteorite. *Meteorit. Planet. Sci.*, **50**(S1), 5272.
- Grokhovsky V.I., Kohout T., Gritsevich M., Koneva E.V. (2014) Physical properties, structure and fracturing of the Chelyabinsk LL5 meteorite body. *Meteorit. Planet. Sci.*, **49**(S1), 5364.
- Grokhovsky V.I., Muftakhetdinova R.F., Yakovlev G.A., Brusnitsyna E.V., Petrova E.V. (2020) Post-impact metamorphism of the Chelyabinsk meteorite in shock experiment. *Planet. Space Sci.*, **192**, 105050.
- Yang C.-W., Williams D.B., Goldstein J.I. (1996) A revision of the Fe–Ni phase diagram at low temperature. *J. Phase Equilibria*, **17**, 522-531.
- the Chelyabinsk meteorite. *Lithosphere* (Russia), (3), 89-105. (In Russ.)
- Bogomolov E.S., Skublov S.G., Marin Yu.B., Stepanov S.Yu., Antonov A.V., Galankina O.L. (2013) Sm–Nd Age and Isotope Geochemistry of Minerals of the Chelyabinsk Meteorite. *Dokl. Earth. Sci.*, **452**(2), 1034-1038 (translated from *Dokl. AN*, **452**(5), 548-553).
- Brusnitsyna E.V., Badekha K.A., Grokhovsky V.I., Muftakhetdinova R.F. (2018) Martensite morphology in different types of meteorites. *Meteorit. Planet. Sci.*, **53**(S1), 6290.
- Brusnitsyna E.V., Muftakhetdinova R.F., Yakovlev G.A. (2023) Metallographic estimation of extraterrestrial matter heating degree. *Ural school for young metal scientists. Collection of articles from the conference of the XXII Ural School-Seminar of Metallurgists – Young Scientists*. (Ed. by A.A. Popov). Ekaterinburg, Azhur Publ., 152-156. (In Russ.)
- Brusnitsyna E.V., Muftakhetdinova R.F., Yakovlev G.A., Kiryakov A.N. (2023) Structural changes in the metallic particles of the Calama 009 ordinary chondrite after heating. *Meteorit. Planet. Sci.*, **58**(S1), 6251.
- Galimov E.M., Kolotov V.P., Nazarov M.A., Kostitsyn Yu.A., Kubrakova I.V., Kononkova N.N., Roshchina I.A., Alexeev V.A., Kashkarov L.L., Badyukov D.D., Sevast'yanov V.S. (2013) Analytical Results for the Material of the Chelyabinsk Meteorite. *Geochem. Int.*, **51**, 522-539 (translated from *Geokhimiya*, **51**(7), 580-598).
- Grokhovsky V.I., Brusnitsyna E.V., Yakovlev G.A. (2015) Haxonite in Chelyabinsk LL5 meteorite. *Meteorit. Planet. Sci.*, **50**(S1), 5272.
- Grokhovsky V.I., Kohout T., Gritsevich M., Koneva E.V. (2014) Physical properties, structure and fracturing of the Chelyabinsk LL5 meteorite body. *Meteorit. Planet. Sci.*, **49**(S1), 5364.
- Grokhovsky V.I., Muftakhetdinova R.F., Yakovlev G.A., Brusnitsyna E.V., Petrova E.V. (2020) Post-impact metamorphism of the Chelyabinsk meteorite in shock experiment. *Planet. Space Sci.*, **192**, 105050.
- Khanchuk A.I., Grokhovsky V.I., Ignatiev A.V., Velivetskaya T.A., Kiyashko S.I. (2013) First data on the isotope composition of oxygen, carbon and sulfur of the Chelyabinsk meteorite. *Dokl. Earth. Sci.*, **452**(1), 967-970 (translated from *Dokl. AN*, **452**(3), 317-320).
- Marakushev A.A. (1988) Petrology. Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 311 p. (In Russ.)
- Stepanov S.Yu., Berzin S.V. (2015) Trace element composition of troilite, iron and iron-nickel metall from meteorite Chelyabinsk. *Lithosphere* (Russia), (1), 98-108. (In Russ.)
- Yang C.-W., Williams D.B., Goldstein J.I. (1996) A revision of the Fe–Ni phase diagram at low temperature. *J. Phase Equilibria*, **17**, 522-531.
- Yavnel' A.A. (1983) Ordered structure of FeNi in meteorites and phase diagram of the iron-nickel system. *Meteoritika*, **42**, 66-71. (In Russ.)

## REFERENCES

- Anfilogov V.N., Belogub E.V., Blinov I.A., Eremyashin V.E., Kabanova L.Ya., Lebedeva S.M., Lonshchakova G.F., Khvorov P.V. (2013) Petrography, mineralogy and structure of the Chelyabinsk meteorite. *Lithosphere* (Russia), (3), 118-129. (In Russ.)
- Badyukov D.D., Raitala J., Kostama P., Ignatiev A.V. (2015) Chelyabinsk Meteorite: Shock Metamorphism, Black Veins and Impact Melt Dikes, and the Hugoniot. *Petrology*, **23**, 103-115.
- Berzin S.V., Erokhin Yu.V., Ivanov K.S., Hiller V.V. (2013) Features of the mineral and geochemical composition of