

## МЕТЕОРИТ ЧЕЛЯБИНСК LL5: 10 ЛЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДАМИ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДИФРАКЦИИ И МЕССБАУЭРОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ С ВЫСОКИМ СКОРОСТНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

**Оштрах М.И.<sup>1</sup>, Максимова А.А.<sup>1,2</sup>, Петрова Е.В.<sup>1</sup>, Чукин А.В.<sup>1</sup>, Гроховский В.И.<sup>1</sup>, Семенкин В.А.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия, oshtrakh@gmail.com

<sup>2</sup>Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия

Утром 15 февраля 2013 г. в 9-22 местного времени в Челябинской области упал крупный метеороид. Разрушение метеороида привело к падению на землю огромного количества крупных и мелких фрагментов на большой площади. Метеоритная экспедиция Уральского федерального университета на следующий день начала поиск этих фрагментов и через 59 часов уже исследовала вещество в лаборатории. После анализа вещества фрагментов метеорита он был зарегистрирован как обыкновенный хондрит группы LL5, с ударной степенью S4, степенью окисления W0 и назван Челябинск (Meteoritical Bulletin № 102, 2013). Оказалось, что вещество обыкновенного хондрита Челябинск LL5 представляет собой брекчию с несколькими литологиями, а также присутствием переплавленного с разной степенью вещества. Поэтому началось исследование фрагментов метеорита с разной литологией такими методами, как оптическая микроскопия, сканирующая электронная микроскопия (SEM) с энергодисперсионной спектроскопией (EDS), рентгеновская дифракция (XRD), мессбауэровская спектроскопия с высоким скоростным разрешением и некоторыми другими методами. За 10 лет исследований были получены различные новые результаты [Oshtrakh et al., 2014, 2016, 2019; Maksimova et al., 2014a, 2014b, 2015, 2016a, 2016b, 2017], которые обобщены в настоящей работе.

Были исследованы пять фрагментов обыкновенного хондрита Челябинск LL5 с различной литологией: No 1 и No 1a со светлой литологией, No 2 и No 2a со смешанной литологией и No 3, представляющий собой переплав (ранее обозначенный как черная литология). У фрагментов No 1a и No 2a была также исследована кора плавления. Исследование шлифов этих фрагментов с помощью оптической микроскопии, SEM и EDS показало наличие различных железосодержащих фаз, таких как оливин  $(\text{Fe,Mg})_2\text{SiO}_4$ , ортопироксен  $(\text{Fe,Mg})\text{SiO}_3$ , клинопироксен  $(\text{Fe,Ca,Mg})\text{SiO}_3$ , троилит FeS, хромит  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ , герцинит  $\text{FeAl}_2\text{O}_4$ , ильменит  $\text{FeTiO}_3$ , сплав Fe-Ni-Co, состоящий из  $\alpha\text{-Fe}(\text{Ni,Co})$ ,  $\alpha_2\text{-Fe}(\text{Ni,Co})$  и  $\gamma\text{-Fe}(\text{Ni,Co})$  фаз. Измерения XRD под-

твердили эти результаты. Рентгеновские дифрактограммы внутреннего вещества и коры плавления фрагментов метеорита Челябинск LL5 приведены на рис. 1. Из данных XRD были получены некоторые отличия относительного содержания фаз в разных фрагментах, а также значения параметров решетки для силикатных кристаллов, по которым были рассчитаны заселенности позиций M1 и M2 в оливине, ортопироксене и клинопироксене катионами  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ . В рентгенограммах коры плавления был обнаружен магнезиоферрит  $(\text{Mg,Fe})\text{Fe}_2\text{O}_4$ .

Мессбауэровские спектры образцов метеорита Челябинск LL5, измеренные с высоким скоростным разрешением в 4096 каналов и конвертированные в 1024 канала для увеличения соотношения сигнал/шум для минорных компонент спектров, оказались гораздо информативнее, чем спектр, измеренный с низким скоростным разрешением в 256 каналов [Szlachta et al., 2014], см. сравнение в [Maksimova, Oshtrakh, 2021] (рис. 2). Аппроксимация мессбауэровских спектров всех фрагментов проводилась с использованием симуляции полного статического Гамильтониана для компоненты троилита и учетом минорных компонент, таких как хромит, герцинит, ильменит и парамагнитная фаза  $\gamma\text{-Fe}(\text{Ni,Co})$ , а также с учетом компонент, соответствующих ядрам  $^{57}\text{Fe}$  в позициях M1 и M2 в кристаллах силикатных фаз. В мессбауэровских спектрах коры плавления, в отличие от внутренней области, выявлены компоненты, соответствующие магнезиоферриту.

В результате наилучшей аппроксимации мессбауэровских спектров определены основные и минорные железосодержащие фазы, оценены относительные доли железа в каждой фазе, которые оказались отличны для разных фрагментов, а также получены отношения заселенностей позиций M1 и M2 катионами  $\text{Fe}^{2+}$  в силикатных кристаллах, которые оказались близки к аналогичным отношениям, оцененным из данных XRD. С использованием этих оценок были проведены расчеты температуры равновесного катионного упорядочения для оливина и ортопирок-

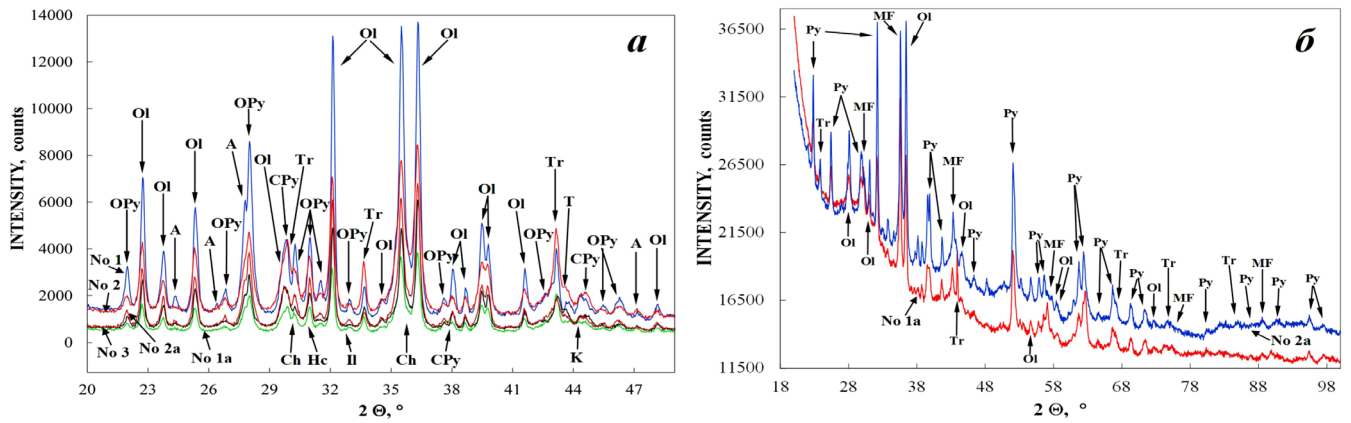


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы внутренней области (а) и коры плавления (б) фрагментов метеорита Челябинск LL5 No 1, No 1a, No 2, No 2a и No 3. OI – оливин, OPy (Py) – ортопироксен, CPy – клинопироксен, А – анортит, Tr – троилит, Ch – хромит, Hc – герцинит, Il – ильменит, К – α-Fe(Ni,Co), Т – γ-Fe(Ni,Co), MF – магнезиоферрит

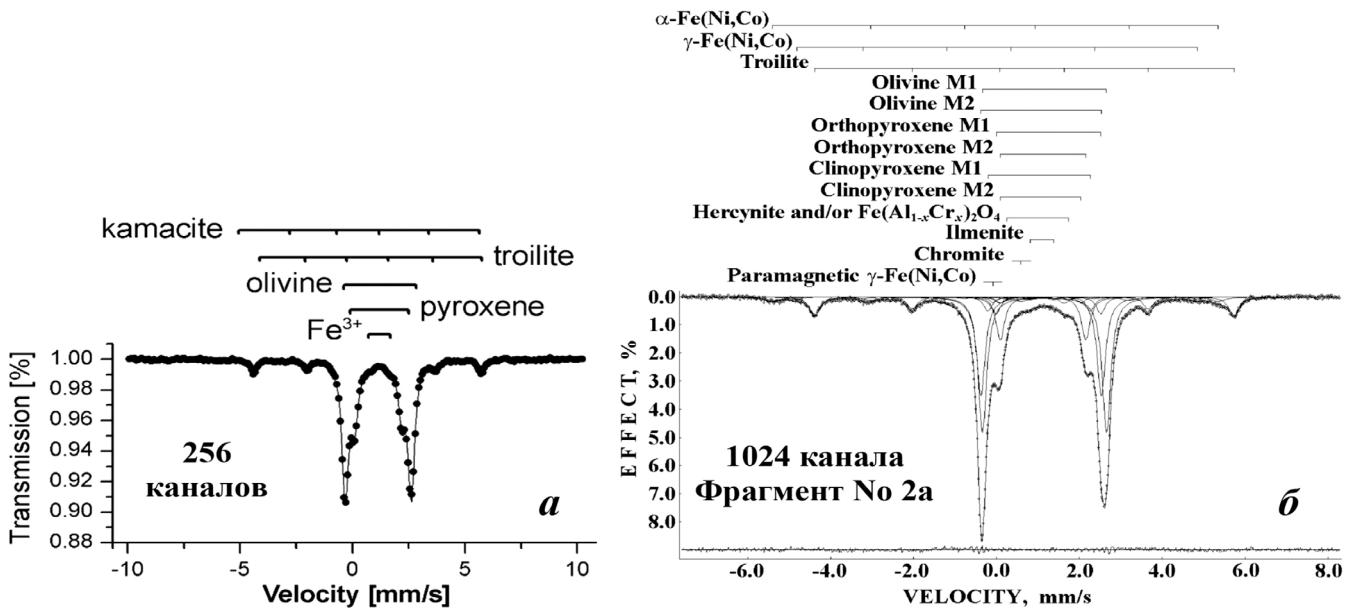


Рис. 2. Мессбауэровские спектры фрагментов метеорита Челябинск LL5, измеренные с низким (а) и высоким (б) скоростным разрешением. Указанные компоненты – результаты наилучших аппроксимаций. Дифференциальный спектр приведен снизу (б). T=295 К

сена. Эти температуры, полученные из результатов двух независимых методов: XRD и мессбауэровской спектроскопии, оказались сравнимы для соответствующих фаз фрагментов обыкновенного хондрита Челябинск LL5.

Сравнение мессбауэровских спектров внутренней области и коры плавления фрагментов No 1a и No 2a показало, что относительные площади компонент магнезиоферрита в коре плавления фрагмента No 1a больше, чем фрагмента No 2a, хотя внутренняя область фрагмента No 1a содержит меньшую суммарную долю силикатных фаз, чем фрагмент No 2a. Это может свидетельствовать о меньшем времени пролета

в атмосфере фрагмента No 2a, чем фрагмента No 1a, и о его более глубоком расположении в метеороиде.

Проведено сравнение параметров сверхтонкой структуры ядер  $^{57}\text{Fe}$  для одинаковых фаз как для разных фрагментов метеорита Челябинск LL5, так и для других обыкновенных хондритов. Показано как сходство параметров, так и их различие, которое может свидетельствовать об отличиях в локальном микроокружении ядер  $^{57}\text{Fe}$  в одинаковых фазах разных метеоритов.

Данная работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FEUZ-2023-0013, М.И.О., А.А.М.,

*Е.В.П. и В.И.Г. поддержаны Программой развития УрФУ «Приоритет-2030».*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Maksimova A.A., Chukin A.V., Oshtrakh M.I. Revealing of the minor iron-bearing phases in the Mössbauer spectra of Chelyabinsk LL5 ordinary chondrite fragment // Proceedings of the International Conference “Mössbauer Spectroscopy in Materials Science 2016”, Eds. J. Tuček, M. Miglierini, AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, Melville, New York. 2016a. V. 1781. P. 020016.
2. Maksimova A.A., Chukin A.V., Semionkin V.A., Oshtrakh M.I. The Fe<sup>2+</sup> occupancies in the silicates M1 and M2 sites in Chelyabinsk LL5 meteorite determined using XRD and Mössbauer spectroscopy // Bull. Rus. Acad. Sci.: Phys. 2017. V. 81. P. 845–849.
3. Maksimova A.A., Klencsár Z., Oshtrakh M.I., Petrova E.V., Grokhovsky V.I., Kuzmann E., Homonnay Z., Semionkin V.A. Mössbauer parameters of ordinary chondrites influenced by the fit accuracy of the troilite component: An example of Chelyabinsk LL5 meteorite // Hyperfine Interact. 2016b. V. 237. P. 33.
4. Maksimova A.A., Oshtrakh M.I. Applications of Mössbauer spectroscopy in meteoritical and planetary science, Part I: undifferentiated meteorites // Minerals. 2021. V. 11. P. 612.
5. Maksimova A.A., Oshtrakh M.I., Klencsár Z., Petrova E.V., Grokhovsky V.I., Kuzmann E., Z., Semionkin V.A. A Comparative study of troilite in bulk ordinary chondrites Farmington L5, Tsarev L5 and Chelyabinsk LL5 using Mössbauer spectroscopy with a high velocity resolution // J. Mol. Struct. 2014a. V. 1073. P. 196–201.
6. Maksimova A.A., Oshtrakh M.I., Petrova E.V., Grokhovsky V.I., Semionkin V.A. Study of Chelyabinsk LL5 meteorite fragment with light lithology and its fusion crust using Mössbauer spectroscopy with a high velocity resolution // Proceedings of the International Conference “Mössbauer Spectroscopy in Materials Science 2014”, Eds. J. Tuček, M. Miglierini, AIP Conference Proceedings, Melville, New York. 2014b. V. 1622. P. 24–29.
7. Maksimova A.A., Oshtrakh M.I., Petrova E.V., Grokhovsky V.I., Semionkin V.A. The <sup>57</sup>Fe hyperfine interactions in the iron bearing phases in different fragments of Chelyabinsk LL5 meteorite: a comparative study using Mössbauer spectroscopy with a high velocity resolution // Hyperfine Interact. 2015. V. 230. P. 79–87.
8. Oshtrakh M.I., Maksimova A.A., Chukin A.V., Petrova E.V., Jenniskens P., Kuzmann E., Grokhovsky V.I., Homonnay Z., Semionkin V.A. Variability of Chelyabinsk meteoroid stones studied by Mössbauer spectroscopy and X-ray diffraction // Spectrochim. Acta, Part A: Molec. and Biomolec. Spectroscopy. 2019. V. 219. P. 206–224.
9. Oshtrakh M.I., Maksimova A.A., Klencsár Z., Petrova E.V., Grokhovsky V.I., Kuzmann E., Homonnay Z., Semionkin V.A. Study of Chelyabinsk LL5 meteorite fragments with different lithology using Mössbauer spectroscopy with a high velocity resolution // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2016. V. 308. P. 1103–1111.
10. Oshtrakh M.I., Petrova E.V., Grokhovsky V.I., Semionkin V.A. Characterization of a Chelyabinsk LL5 meteorite fragment using Mössbauer spectroscopy with a high velocity resolution // Hyperfine Interact. 2014. V. 226. P. 559–564.
11. Szlachta K., Woźniak M., Gałazka-Friedman J. Mössbauer comparative studies of the Sołtmany (L6), Chelyabinsk (LL5) and Grzempach (H5) meteorites // Acta Soc. Meteor. Pol. 2014. V. 5. P. 115–120.