

УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ЭКСПЕРИМЕНТ С МЕТЕОРИТОМ ЧЕЛЯБИНСК LL5: ПАРАМЕТРЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И СТРУКТУРА УДАРНО-ПРЕОБРАЗОВАННОГО ВЕЩЕСТВА

© 2019 г. Е. В. Петрова^{а,*}, В. И. Гроховский^а, Т. Кохоут^б,
Р. Ф. Муфтахетдинова^а, Г. А. Яковлев^а

^аУральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Физико-технологический институт

Россия, 620002 Екатеринбург, ул. Мира, 19/5

^бHelsinki University, Faculty of Science

Finland, 00014 Helsinki, Gustaf Hällströmin katu 2, PL64

*e-mail: evgeniya.petrova@urfu.ru

Поступила в редакцию 16.01.2019 г.

После доработки 12.02.2019 г.

Принята к печати 15.02.2019 г.

Ударный эксперимент с веществом светлой литологии обыкновенного хондрита Челябинск LL5 был выполнен в условиях сферической геометрии. Вещество претерпело ударный и термический метаморфизм от исходного S3/4 до полного плавления. Реализованные давление и температура в центре образца оцениваются в более чем 90 ГПа и более 2000°C. Методами оптической и электронной микроскопии рассмотрены структурные ударные эффекты. В рамках одного ударного воздействия удалось реализовать весь спектр ударных давлений и температур от исходного вещества до полного переplava. Петрографический анализ выявил наличие четырех зон: 1 – зоны переplava, 2 – зоны плавления силикатов, 3 – зоны черного кольца, 4 – зоны слабоударенного исходного вещества. Показано вытеснение металлической и сульфидной фаз из центральной области переplava; формирование зоны «смешанной» литологии – светлых хондр в расплаве силикатов, обогащенном троилитом; образование кольца из темной литологии; возникновение радиальных ударных жил. В экспериментальном образце получены зоны, соответствующие типам литологий отдельных фрагментов метеоритного дождя Челябинск, представленным в коллекции УрФУ. Полученные результаты доказывают, что предложенный эксперимент позволяет моделировать ударное воздействие, аналогичное происходящим в космическом пространстве. Таким образом, можно моделировать процессы происходившие или планируемые к осуществлению с малыми телами солнечной системы.

Ключевые слова: метеорит Челябинск, обыкновенный хондрит, ударный эксперимент, сферическое ударное обжатие, структура, текстура, ударный метаморфизм

DOI: 10.31857/S0016-7525648859-868

ВВЕДЕНИЕ

Падение метеоритного дождя Челябинск случилось 15 февраля 2013 года примерно в 9 часов 20 минут (UTC+6) на территории Челябинской области (Россия). Официально вещество метеорита было классифицировано как обыкновенный хондрит группы LL, петрологического типа 5, степень ударного метаморфизма 4, земного выветривания – 0 (LL5 S3/4 W0) (Porova et al., 2013). Особенности структуры вещества, присутствие различных литологий в составе фрагментов метеорита было подробно описано ранее (Galimov et al., 2013; Badyukov et al., 2015; Righter et al., 2015; Kohout et al., 2014). При этом предполагается, что светлая и темная литологии данно-

го обыкновенного хондрита имеют практически одинаковый химический состав, соответствующий хондриту LL5 типа (Galimov et al., 2013). Также отмечаются некоторые отличия в структуре (текстуре) вещества светлой и темной литологий. Существуют несколько возможных объяснений того, в результате каких процессов из вещества светлой литологии может быть сформирована темная литология (Заславская и др., 1984; Мигдисова и др., 1988; Kohout et al., 2014; Badyukov et al., 2015; Righter et al., 2015; Petrova et al., 2016, Петрова и др., 2016, 2017; Даниленко и др., 2017; Triefloff et al., 2018).

Вещество разных литологий можно обнаружить в крупных фрагментах метеорита Челя-

бинск LL5, а также в основной массе метеорита, извлеченной из озера Чебаркуль. Однако основная масса мелких фрагментов метеоритного дождя представлена одним из типов литологии (светлая, темная, ударный расплав). Относительно крупные сечения (до 150 см²) массивных фрагментов метеорита по внешнему виду напоминают зювиты – структуры, сформированные в результате массивных ударных событий, наблюдающихся в породах из ударных кратеров, например, описанные (Stoffler et al., 2013). Предполагается, что вещество Челябинского метеороида было образовано по схожему механизму, когда фрагменты вещества мишени попадают в область ударного расплава и частично в результате этого нагреваются (Petrova et al., 2016; Trieloff et al., 2018).

Ударные события представляют собой неотъемлемую часть процесса эволюции внеземного вещества в космосе. Прохождение фронта ударной волны в веществе внеземного происхождения оказывает существенное влияние на кинетику и механизмы фазовых превращений в слагающих его минералах. Экспериментальное моделирование ударного события с преобразованием вещества в широком диапазоне давлений и температур в пределах одного образца возможно в условиях нагружения сферически сходящимися ударными волнами, как это было показано в (Muftakhetdinova et al., 2018). Более того, представляется интересным провести в метеоритном веществе ударные преобразования и сравнить полученные структуры с результатами ударного метаморфизма «естественного происхождения», образованными в космосе. В случае вещества обыкновенного хондрита Челябинск это возможно благодаря наличию брекчированной структуры, а также наличию фрагментов вещества, доступных для эксперимента.

В данной работе описывается эксперимент по интенсивному ударному воздействию на вещество светлой литологии метеорита Челябинск LL5. Аналогичная методика экспериментального ударного преобразования использовалась ранее для вещества обыкновенных хондритов Саратов L4 (Bezaeva et al., 2010) и Царев L5 (Muftakhetdinova et al., 2017), а также для железных метеоритов Сихоте-Алинь и Чинге (Grokhovsky et al., 1999; Grokhovsky et al., 2000).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Эксперименты по ударному нагружению сферически-сходящимися ударными волнами вещества метеорита Челябинск LL5 проводились в ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИТФ» им. Е.И. Забабахина (г. Снежинск). Образец для эксперимента был подготовлен из вещества фрагмента светлой литологии метеорита Челябинск в виде шара диаметром $39.99 \pm 0,01$ мм. Объем шара составил 33.49 ± 0.01 см³, средняя плотность вещества – 3.48 ± 0.01 г/см³. Проверка однородности светлой литологии вещества, распределения металлических и сульфидных фаз для последующей оценки массопереноса проводилась методом рентгеновской томографии с помощью промышленного компьютерного томографа ХТ Н 450 (X-Tek Nikon Metrology) до помещения образца в стальной герметичный чехол, а также после проведения ударного нагружения.

Схема экспериментального исследования приведена на рис. 1.

По полученным данным 3D-модели исходного шара хондрита Челябинск можно заключить, что образец имеет неоднородную по объему структуру. Содержание включений повышенной плотности (металлической и сульфидной фаз) оценено равным 4.16 % от общего объема

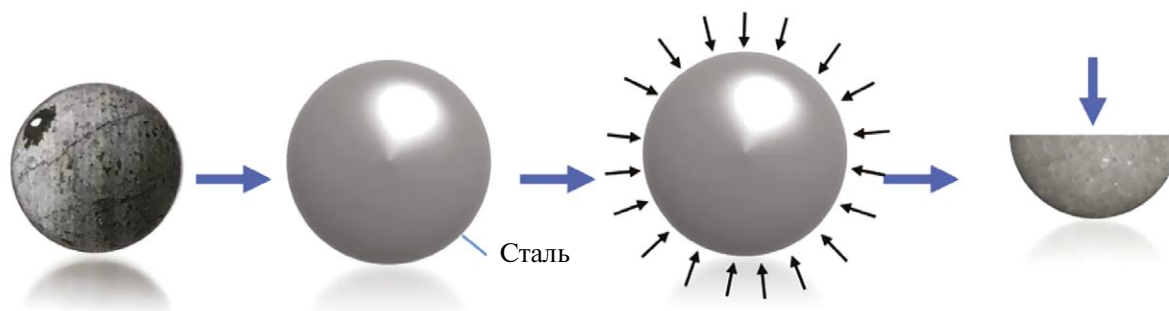


Рис. 1. Схема эксперимента с образцом-шаром из обыкновенного хондрита Челябинск LL5: вытачивание образца в виде шара, установка в стальной герметичный чехол, ударное нагружение сферически-сходящимися ударными волнами, извлечение образца из чехла, изготовление шлифов и исследование комплексом методов.

изучаемого образца. Детальное изучение срезов 3D-модели позволило обнаружить все зоны с пониженной плотностью: поры и небольшие трещины.

Шарообразный образец был помещен в герметичный чехол из стали X18H9 толщиной 6.0 мм в условиях вакуума. Затем было выполнено ударное нагружение шара сферически-сходящимися ударными волнами. Основные особенности эксперимента и первое описание полученных результатов приведено в (Козлов и др., 2015). Используемая экспериментальная методика ранее применялась для исследования метеоритов и других геологических объектов (Kozlov et al., 1994; Bezaeva et al., 2010). Геометрия эксперимента предполагает, что ударные давление и температура увеличиваются от края к центру образца. Сферическая геометрия взрывного нагружения позволяет получить в единичном эксперименте широкий диапазон давлений и температур, и на одном образце в разных зонах по радиусу исследовать различные структурные состояния материала – от сильной пластической деформации в твердом состоянии до испарения при разгрузке ударно-сжатого расплава с последующей конденсацией паров в центральной полости образца. Реализованные в данном эксперименте давление и температура в центре образца оцениваются более чем в 90 ГПа и более 2000°C (Козлов и др., 2015). Охлаждение образца происходило в покое при естественных гравитационных условиях. После полного охлаждения

образец был распилен с получением диаметрального и хордового сечения. Стальной чехол был сохранен на веществе хондрита ввиду его хрупкости и возможного разрушения в результате извлечения. На полученных поверхностях были изготовлены аншлифы, из хордового сечения – тонкий шлиф половины круга.

Микроскопические исследования выполнялись с помощью оптического металлографического микроскопа Carl Zeiss Axiovert 40 MAT, просвечивающего оптического микроскопа Carl Zeiss Jena Laboval 2. Сканирующая электронная микроскопия (SEM) выполнена с помощью Carl Zeiss Sigma VP с возможностями энерго-дисперсионного анализа (EDS) и дифракции обратнорассеянных электронов (EBSD).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основные особенности исходной структуры вещества светлой, темной литологий и ударного расплава хондрита Челябинск описаны в (Галимов и др., 2013; Kohout et al., 2014). Кроме того, вещество разных литологий демонстрирует отличия, которые могут быть обнаружены методами, например, Мессбауэровской спектроскопии (Oshtrakh et al., 2014, 2016), Рамановской спектроскопии (Kaeter et al., 2018), изотопного анализа (Trieloff et al., 2018) и др. В результате эксперимента по ударно-волновому нагружению вещества светлой литологии обыкновенного хондрита Челябинск реали-

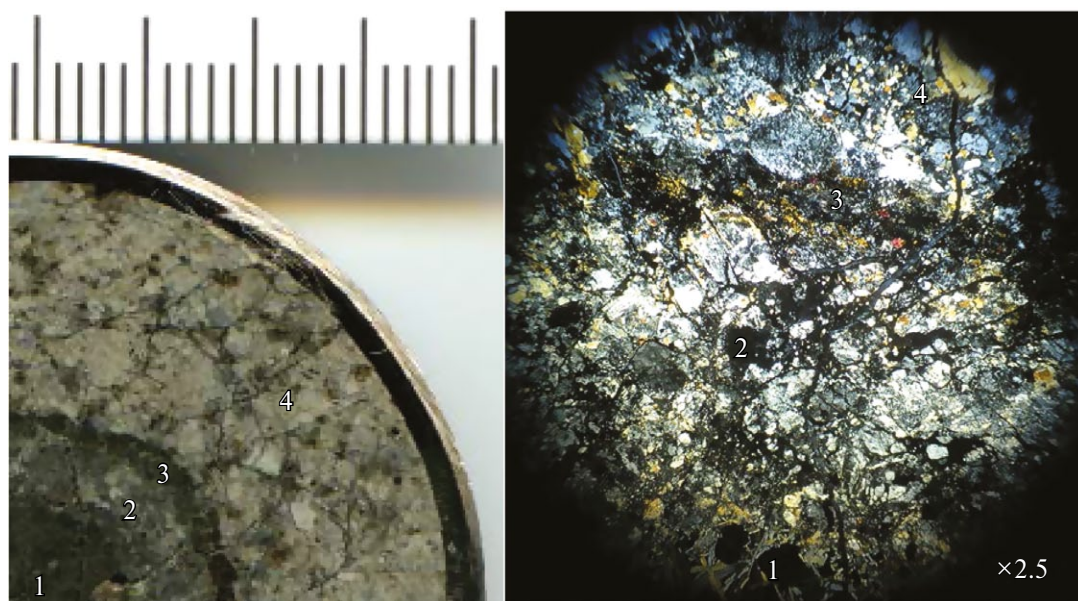


Рис. 2. Фрагмент диаметрального сечения шара из ударно-преобразованного вещества обыкновенного хондрита Челябинск LL5. 1-4 – текстурно-различимые области преобразования вещества: слева – внешний вид, справа – структура тонкого шлифа в поляризованном свете.

зован градиент ударного воздействия и весь спектр ударных структур, реализованный в веществе. Внешний вид полированного фрагмента диаметрального сечения шара вещества после экспериментального воздействия, а также изображение тонкого шлифа в проходящем свете показаны на рис. 2.

Методами оптической и электронной микроскопии рассмотрены структурные ударные эффекты, полученные в каждой из зон градиента воздействий. В рамках одного эксперимента по нагружению ударными волнами удалось реализовать градиент давлений и температур: от исходного вещества до полного переplава.

Петрографический анализ шлифов ударно-преобразованного образца выявил наличие четырех зон:

1 – зона переplава, расположенная в центре шара на расстоянии от 0 до 0,25 от радиуса образца;

2 – зона плавления силикатов, следующая от центра после зоны переplава, формирует кольцо от 0,25 до 0,4 от радиуса шара;

3 – зона формирования темной литологии, или зона черного кольца. Расположена от 0,4 до 0,45 от радиуса шара;

4 – зона дополнительно ударно-нагруженного исходного слабоударенного вещества светлой литологии хондрита Челябинск LL5, расположена от 0,45 радиуса шара до границы раздела: вещество хондрита – металл.

Далее более подробно рассмотрим особенности структуры каждой из зон ударно-преобразованного вещества и гипотезы их формирования.

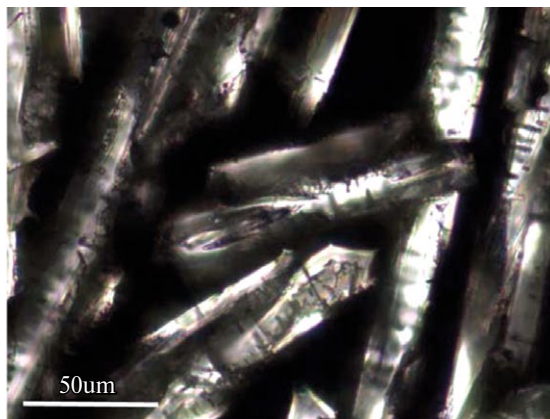
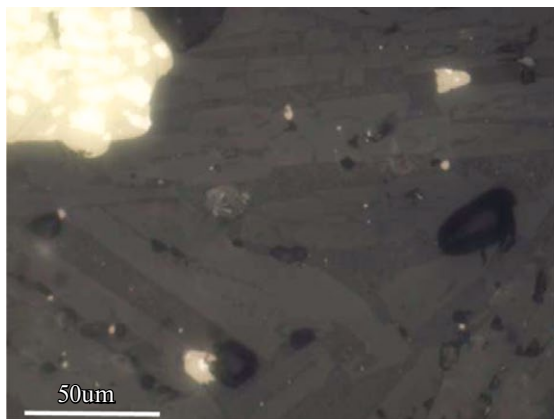


Рис. 3. Оптические изображения вещества экспериментально полученного ударного расплава из вещества светлой литологии обыкновенного хондрита Челябинск: слева – отраженный свет, справа – проходящий свет.

1 – зона переplава

Центральная зона ударно-нагруженного шара представляет собой полный переplав хондритового вещества. Оптические методы позволяют обнаружить вновь образованные крупные балки кристаллов оливина, не демонстрирующие следов ударных воздействий (рис. 3). Для данной зоны характерен темный цвет в отраженном свете. Четкое оптическое погасание кристаллов, пространство между кристаллами заполнено раскристаллизованным стеклом с большим количеством примесей. Примечательно, что в данной зоне произошло вытеснение существенной доли металлической и сульфидной фаз из центральной области переplава. Аналогичные эффекты наблюдались в эксперименте (Bezaeva et al., 2010). При этом в зоне сохранились металл-троилитные ассоциации, присутствующие в виде эвтектической структуры, ассоциированной с округлыми порами (рис. 4). Морфология данных структур указывает на процесс выделения газов в результате ударного переplава. Степень ударного метаморфизма по шкале Stoffler (Stoffler et al., 1991), соответствующая данной зоне, – ударный расплав; давление, которое испытало вещество, составляет не менее 90 ГПа, температуры превышают 2000°C.

Сравнение зон ударного расплава, наблюдаемого в «натуральном» веществе обыкновенного хондрита Челябинск и полученного в результате эксперимента, показывает, что имеются некоторые структурные отличия:

– кристаллы оливина в «ударном» расплаве имеют более крупные размеры, что связано с меньшей скоростью охлаждения ударного расплава в Земных условиях по сравнению с охлаждением в космическом пространстве;

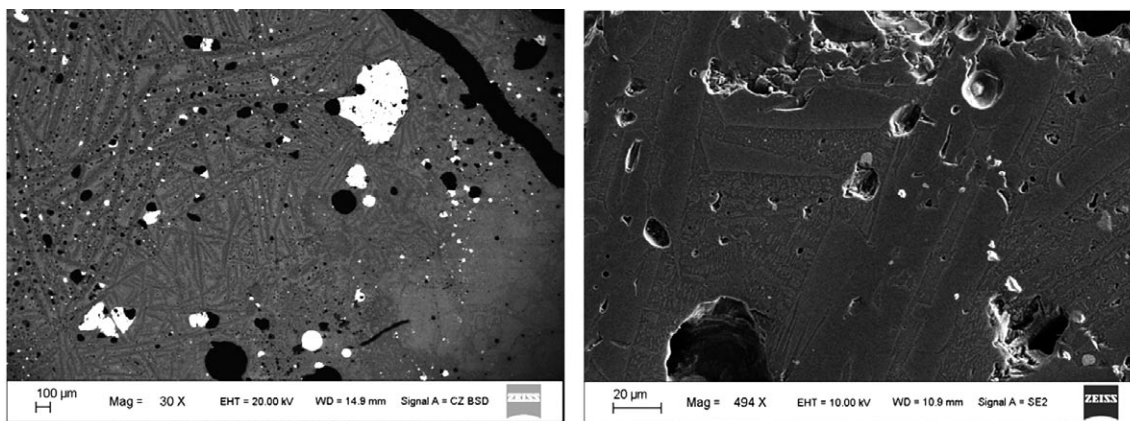


Рис. 4. Электронное изображение структуры экспериментально полученного ударного расплава из вещества светлой литологии обыкновенного хондрита Челябинск.

– в структуре «ударенного» расплава можно наблюдать больше пор, чем в «натуральном» ударном расплаве. Это также обуславливается как отличием скорости охлаждения вещества после ударных нагрузок, так и разницей в давлении в веществе, реализуемом после прохождения фронта ударной волны.

2 – зона плавления силикатов

С областью формирования ударного расплава граничит область смешанной литологии, которая внешне представляет собой округлые области светлой литологии (хондры, реликты, фрагменты светлой литологии, диаметром 1,5–3 мм), окруженные расплавом силикатов более темного цвета. Вещество смешанной литологии не является распространенным в массе образцов дождя обыкновенного хондрита Челябинск, тем не менее внешний вид и исследование данной литологии приведены в работе (Maksimova et al., 2015). Поэтому формирование данной зоны в результате экспери-

ментального ударного воздействия представляет особый интерес.

В области смешанной литологии (рис. 5, 6) наряду с реликтами зерен оливина и неизменными зернами хромитов присутствуют жилки троилита – заполненные расплавом трещины в силикатах. В проходящем свете это можно наблюдать как области непрозрачных фаз наряду с прозрачными кристаллами силикатов. Кроме того, можно обнаружить вытеснение расплава металла и троилита из зоны ударного расплава и, как следствие, обогащение зоны смешанной литологии (рис. 6). Результаты оценки распределения частиц металла и троилита в объеме ударно-преобразованного образца вещества хондрита Челябинск LL5, полученные методом рентгеновской томографии, подтверждают перемещение металлической фазы из центральной области ударного расплава.

Модель формирования экспериментально полученного вещества смешанной литологии

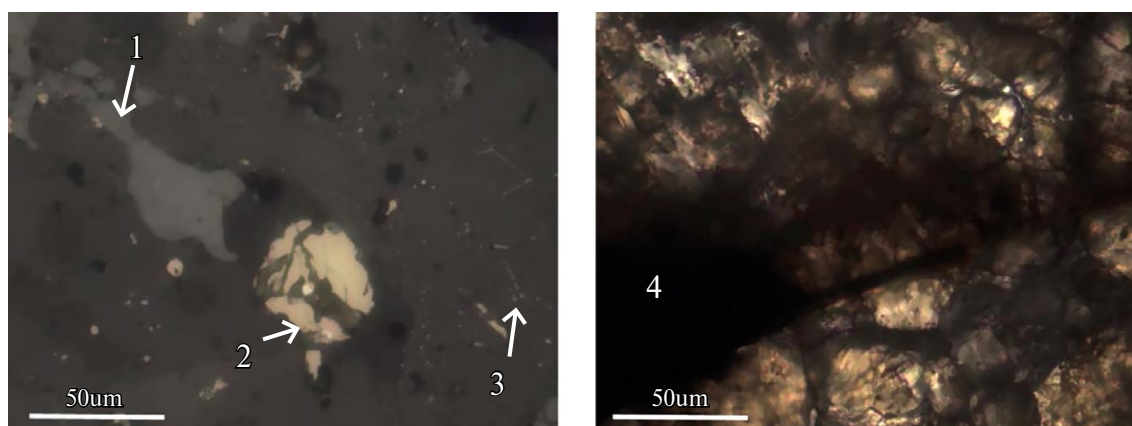


Рис. 5. Оптические изображения вещества экспериментально полученной смешанной литологии из вещества светлой литологии обыкновенного хондрита Челябинск: слева – отраженный свет, справа – проходящий свет. 1 – хромовая шпинель, 2 – реликтовое зерно троилита, 3 – жилки, заполненные троилитом, 4 – непрозрачные фазы.

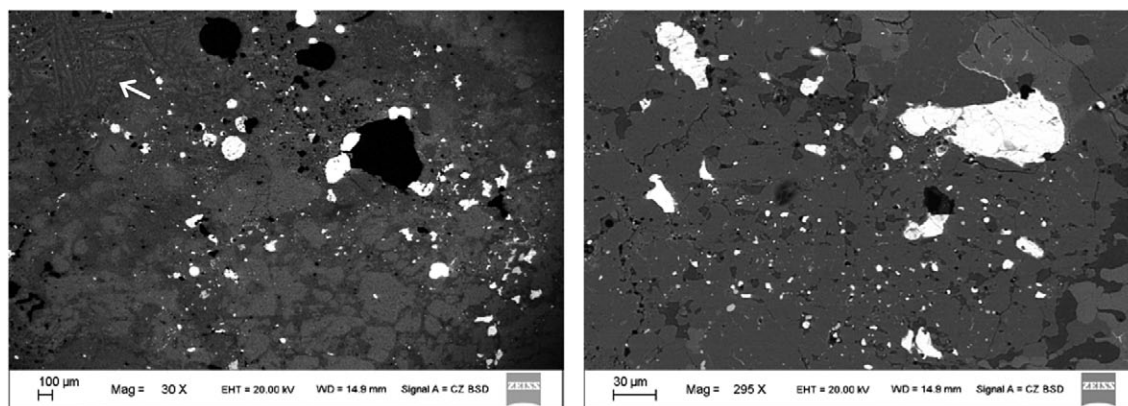


Рис. 6. Электронное изображение структуры экспериментально полученной смешанной литологии из вещества светлой литологии обыкновенного хондрита Челябинск. Стрелкой показана зона ударного расплава.

была предложена (Kohout et al., 2018) и заключается в плавлении силикатной матрицы, приводящем к предохранению хондр и нерасплавленных зерен силикатов от проникновения в их трещины расплава смеси металла и троилита за счет образования двух несмешиваемых жидкостей. Степень ударного метаморфизма, соответствующая данной зоне, – S6, что соответствует ударным нагрузкам до 75 ГПа и температурам 1500–1750°C (Stoffler et al., 1991).

3 – зона темной литологии

Зона темной литологии, полученная в ударном эксперименте, представлена наименьшим объемом среди всех образованных зон. Оптические исследования в проходящем свете демонстрируют значительное количество непрозрачных фаз (рис. 7), что связано с проникновением расплава металла и троилита в трещины силикатных минералов. В результате проходящий свет не может пройти сквозь рассматриваемую область, формируются значительные по площади

зоны полного затемнения, представленные на аншлифе в виде черного кольца.

При визуальном осмотре сечения шара отмечено, что преобладающая часть всех видимых трещин сосредоточена в области, расположенной в центральной части и до области темной литологии. Это объясняется тем, что данная область подверглась значительной пластической деформации.

Механизм образования кольца из темной литологии можно связать с заполнением многочисленных мелких трещин в силикатных кристаллах расплавом жидкого металла и троилита. Структура вещества темной литологии, полученной экспериментально, полностью соответствует структуре «натуральной» темной литологии, описанной в работах (Галимов и др., 2013; Galimov et al., 2013; Kohout et al., 2014). Степень ударного метаморфизма для вещества темной литологии, полученной экспериментальным путем, – S5, что соответствует

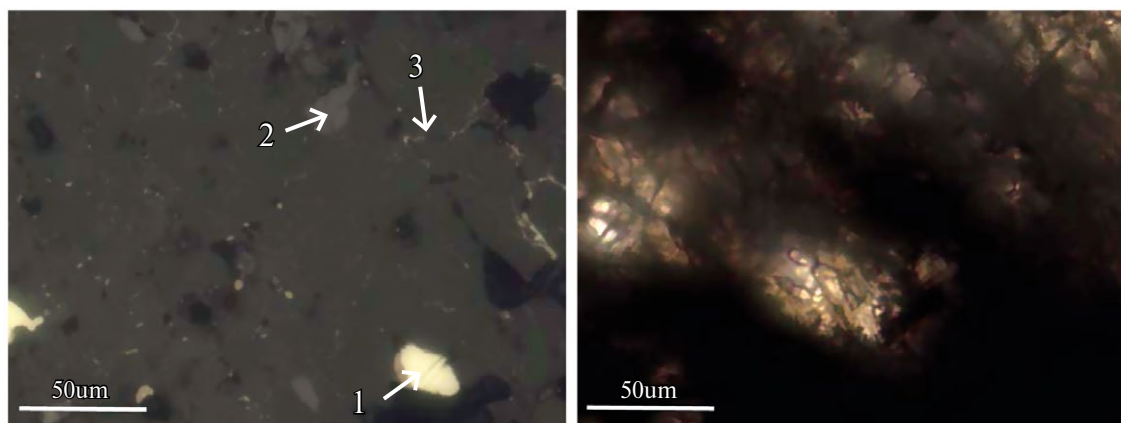


Рис. 7. Оптические изображения вещества экспериментально полученной темной литологии из вещества светлой литологии обыкновенного хондрита Челябинск: слева – отраженный свет, справа – проходящий свет. 1 – металл, 2 – хромит, 3 – расплав металла и троилита.

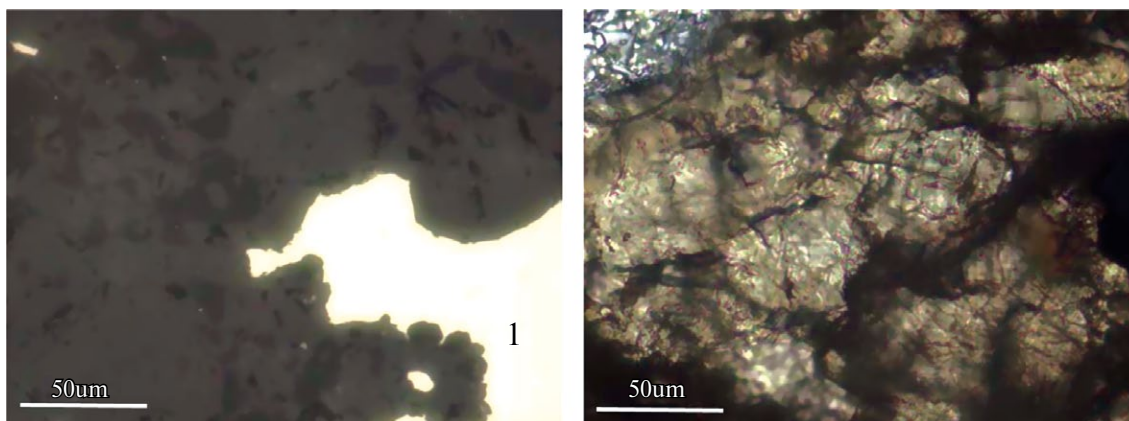


Рис. 8. Оптические изображения вещества экспериментально преобразованной светлой литологии из вещества светлой литологии обыкновенного хондрита Челябинск: слева – отраженный свет, справа – проходящий свет.

ударным нагрузкам 45–55 ГПа и температурам 600–850°C (Stoffler et al., 1991).

4 – зона светлой литологии

В части образца, соответствующей светлой литологии (рис. 8), характерно возникновение радиальных ударных жилок, заполненных расплавом (рис. 9), при этом сохраняется структура основной литологии: развитая форма металлических и сульфидных зерен, трещиноватость и прозрачность кристаллов силикатов аналогична их морфологии в «натуральной» светлой литологии. Волнистое оптическое погасание в пироксенах, слабое проявление мозаицизма в кристаллах оливина соответствует ударной степени S3/4, характерной исходному веществу. Ударные нагрузки, которое претерпело вещество, согласно (Stoffler et al., 1991), составляли около 30 ГПа, при этом повышение температуры вещества составляло 350°C.

Выполнение экспериментов по нагружению сферически-сходящимися ударными волнами вещества обыкновенного хондрита Челябинск позволило реализовать широкий диапазон давлений и температур, что привело к формированию концентрического градиента структур в шарообразном образце. В результате проведенных исследований в экспериментальном образце получены зоны, соответствующие типам литологий отдельных фрагментов метеоритного дождя Челябинск, представленным в коллекции УрФУ. Полученные данные подтверждают модель формирования вещества разных литологий обыкновенного хондрита Челябинск LL5 из исходного вещества светлой литологии в результате ударного события в родительском теле.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сферический ударный эксперимент, проведенный с веществом светлой литологии обыкновенного хондрита Челябинск LL5, позволил

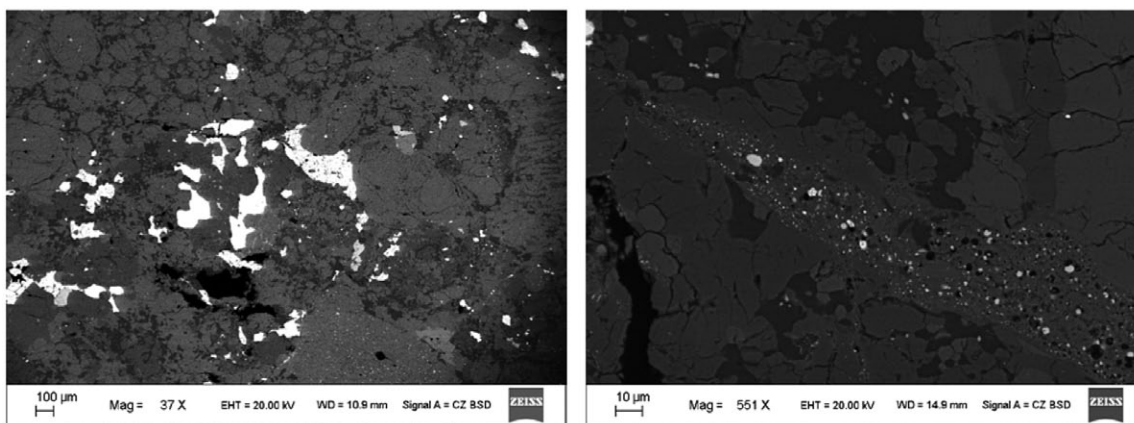


Рис. 9. Электронное изображение структуры экспериментально полученной смешанной литологии из вещества светлой литологии обыкновенного хондрита Челябинск. Слева – индивидуальные зерна металла, троилита, хромита в силикатном окружении; справа – ударная жилка.

реализовать ударный и термический метаморфизм в веществе от исходной степени метаморфизма S3/4 до массивного плавления породы. Реализованные давление и температура в центре образца превысили 90 ГПа и 2000°C. При этом в результате одного экспериментального воздействия удалось реализовать весь спектр ударных давлений и температур.

Исследование экспериментально-метаморфизованного шара позволило подтвердить следующие предположения:

– вещество темной литологии и ударный расплав представляют собой ударно-преобразованное вещество светлой литологии;

– характер распределения частиц металла и троилита в исходном веществе и экспериментально измененном меняется с характером литологии. В области темной литологии микротрещины силикатных минералов представляют собой жилки, заполненные расплавом троилита и металла. Структура темной литологии, полученная в экспериментально ударенном образце, соответствует структуре темной литологии, присутствующей в образцах хондрита Челябинск LL5;

– в результате эксперимента в шаровом образце получена редкая зона смешанной литологии, формирование которой предполагает плавление силикатов;

– структура ударного расплава, полученного в эксперименте, соответствует полученным ударным нагрузкам более 90 ГПа.

По данным выполненного натурного эксперимента и комплексного изучения структуры метеорита Челябинск LL5 подтверждается модель формирования структуры брекчии в родительском теле Челябинского метеороида в результате массивного ударного события. Полученные результаты доказывают, что предложенный эксперимент позволяет моделировать ударное воздействие, аналогичное происходящим в космическом пространстве. Таким образом, для развития будущих миссий можно моделировать процессы, происходившие или планируемые к осуществлению с малыми телами Солнечной системы, путем нагружения соответствующих образцов сферически-сходящимися ударными волнами.

Источник финансирования

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки (проекты № 5.3451.2017/4.6 и № 5.4825.2017/6.7),

Акта 211 Правительства Российской Федерации, соглашение № 02.А03.21.0006, гранта РФФИ № 18-38-00598 и Академии наук Финляндии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Галимов Э.М., Колотов В.П., Назаров Н.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* (7), 580–598. 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** (7), 522–539.

Даниленко И.А., Петрова Е.В. (2017) Природа потемнения вещества метеоритов. *Материалы V конференции молодых ученых с международным участием «Метеориты. Астероиды. Кометы»*. Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 48–51.

Заславская Н.И., Мигдисова Л.Ф., Щербовский Е.Я. (1984) О химическом составе хромита и ильменита ударно-метаморфизованного хондрита Царев. *Метеоритика* **43**, 93–97.

Козлов Е.А. Дегтярев А.А., Ольховский А.В., Ткачев О.В., Варфоломеев Д.А., Щукина Е.Н. (2015) Сферические взрывные эксперименты по обжатию с сохранением фрагментов метеоритов «Челябинск» и «Царев». Основные результаты микротомографических исследований. *XVII Харитоновские тематические научные чтения, 23–27 марта 2015 г.* Сборник материалов конференции. г. Саров.

Мигдисова Л.Ф., Кононкова Н.Н. (1988) Хондрит Первомайский – петрология и ударный метаморфизм. *Метеоритика* **48**, 18–21.

Петрова Е.В., Гроховский В.И. (2016) Формирование структуры вещества метеорита Челябинск. *Минералы: строение, свойства, методы исследования: Материалы VIII Всероссийской молодежной научной конференции (Екатеринбург, 17–20 октября 2016 г.)*. Екатеринбург: Издательство ООО «Универсальная Типография «Альфа Принт», 135–136.

Петрова Е.В., Гроховский В.И. (2017) Структурные изменения в хондрите Челябинск LL5 при термическом и ударном воздействии. *Материалы V конференции молодых ученых с международным участием «Метеориты. Астероиды. Кометы»*. Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 132–135.

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** (2), 103–115.

Bezaeva N.S., Badyukov D.D., Rochette P., Gattacceca J., Trukhin V.I., Kozlov E.A., and Uehara M. (2010) Experimental shock metamorphism of the L4 ordinary chondrite

- Saratov induced by spherical shock waves up to 400 GPa. *Meteorit. Planet. Sci.* **45** (6), 1007–1020.
- Grokhovsky V.I., Kozlov E.A., Kuzina M.S., Gundyrev V.M., Teplov V.A. (1999) Shock experiment in spherical waves with iron meteorites. *Meteorit. Planet. Sci.* **34** (S4), A48.
- Grokhovsky V.I., Kozlov E.A., Kuzina M.S., Teplov V.A. (2000) Shock experiment in spherical waves with iron meteorites. *Meteorit. Planet. Sci.*, **35** (S5), A66.
- Grokhovsky V. I., Kozlov E. A., Muftakhetdinova R. F., and E. V. Petrova (2018) Spherical shock experiments with Chelyabinsk meteorite: experiment setup and insight into results. *Meteorit. Planet. Sci.* **53** (S1), 6347.
- Kaeter D., Ziemann M. A., Böttger U., Weber I., Hecht L., Voropaev S. A., Korochantsev A. V., and Kocherov A. V. (2018) The Chelyabinsk meteorite: New insights from a comprehensive electron microscopy and Raman spectroscopy study with evidence for graphite in olivine of ordinary chondrites. *Meteorit. Planet. Sci.* **53** (3), 416–432.
- Kohout, T., Gritsevich, M., Grokhovsky, V.I., Yakovlev, G.A., Haloda, J., Halodova, P., Michallik, R.M., Penttilä, A. and Muinonen, K. (2014) Mineralogy, reflectance spectra, and physical properties of the Chelyabinsk LL5 chondrite – insight into shock induced changes in asteroid regoliths. *Icarus* **228**, 78–85.
- Kohout T., Petrova E.V. and Grokhovsky V. I. (2018a) Spherical shock experiments with Chelyabinsk meteorite: change in reflectance spectra with increasing shock. *Meteorit. Planet. Sci.* **53** (S1), 6327.
- Kohout T., Petrova E.V., Grokhovsky V.I. (2018b) Spherical shock experiments with Chelyabinsk meteorite: reflectance spectra changes with increasing shock, EPSC 2018, 16–21 September 2018, Berlin, Germany. *EPSC Abstracts* **12**, 827.
- Kozlov E.A. and Zhukov A.V. (1994) Phase transitions in spherical stress waves. In *High Pressure Science and Technology* (Eds. Schmidt S.C., Shaner J.W., Samara G.A., Ross M.). New York: American Institute of Physics, 977–980.
- Maksimova A.A., Petrova E.V., Chukin A.V., Vokhmintsev A.S., Grokhovsky V.I., Weinstein I.A., Semionkin V.A., Oshtrakh M.I. (2015) Spectroscopic study of Chelyabinsk LL5 meteorite: structural peculiarities of iron-bearing minerals in different fragments. In *Proceedings of the 8 European Conference on Mineralogy and Spectroscopy Rome, Italy, September 9–11, 2015* (Andreozzi G.B., Bosi F.). Rome: Università Di Roma, 115–116.
- Muftakhetdinova R.F., Grokhovsky V.I., Yakovlev G.A. (2018) Analysis of structural changes and phase transformations in Sikhote–Alin IIAB iron meteorite under various origin shock deformation. *Letters on materials* **8** (1), 54–58.
- Muftakhetdinova R.F., Petrova E.V., Yakovlev G.A., and V. I. Grokhovsky (2017) The Structural Changes in Ordinary Chondrite Tsarev L5 after Shock Wave Loading. *Meteorit. Planet. Sci.* **52** (S1), A247.
- Oshtrakh, M.I., Petrova, E.V., Grokhovsky, V.I., Semionkin, V.A. (2014) Characterization of a Chelyabinsk LL5 meteorite fragment using Mössbauer spectroscopy with a high velocity resolution. *Hyperfine Interact.* **226**, 559–564.
- Oshtrakh, M.I., Maksimova, A.A., Klencsár, Z., Petrova, E.V., Grokhovsky, V.I., Kuzmann, E., Homonnay, Z., Semionkin, V.A. (2016) Study of Chelyabinsk LL5 meteorite fragments with different lithology using Mössbauer spectroscopy with a high velocity resolution. *J. Radioanal. Nucl. Chem. Vol.* **308**, 1103–1111.
- Petrova E.V., Grokhovsky V. I., and Muftakhetdinova R. F. (2016) Heat Treatment of the Different Structure Zones in the Chelyabinsk Meteorite. *Meteorit. & Planet. Sci.* **51** (S1) A513.
- Popova, O.P., Jenniskens, P., Emel'yanenko, V., Kartashova, A., Biryukov, E., Khaibrakhmanov, S., Shuvalov, V., Rybnov, Yu., Dudorov, A., Grokhovsky, V.I., Badyukov, D.D., Yin, Q.-Z., Gural, P.S., Albers, J., Granvik, M., Evers, L.G., Kuiper, J., Kharlamov, V., Solovyov, A., Rusakov, Yu.S., Korotkiy, S., Serdyuk, I., Korochantsev, A.V., Larionov, M.Yu., Glazachev, D., Mayer, A.E., Gisler, G., Gladkovsky, S.V., Wimpenny, J., Sanborn, M.E., Yamakawa, A., Verosub, K.L., Rowland, D.J., Roeske, S., Botto, N.W., Friedrich, J.M., Zolensky, M.E., Le, L., Ross, D., Ziegler, K., Nakamura, T., Ahn, I., Lee, J. Ik, Zhou, Q., Li, X.H., Li, Q.-L., Liu, Y., Tang, G.-Q., Hiroi, T., Sears, D., Weinstein, I.A., Vokhmintsev, A.S., Ishchenko, A.V., Schmitt-Kopplin, P., Hertkorn, N., Nagao, K., Haba, M.K., Komatsu, M., Mikouchi, T. (2013) Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization. *Science*. **342** (6162), 1069–1073.
- Righter, K., Abell, P., Agresti, D., Berger, E. L., Burton, A. S., Delaney, J. S., Fries, M. D., Gibson, E. K., Haba, M. K., Harrington, R., Herzog, G. F., Keller, L. P., Locke, D., Lindsay, F. N., McCoy, T. J., Morris, R. V., Nagao, K., Nakamura-Messenger, K., Niles, P. B., Nyquist, L. E., Park, J., Peng, Z. X., Shih, C.-Y., Simon, J. I., Swisher III, C. C., Tappa, M. J., Turrin, B. D., and Zeigler, R. A. (2015) Mineralogy, petrology, chronology, and exposure history of the Chelyabinsk meteorite and parent body. *Meteorit. Planet. Sci.* **50** (10), 1790–1819.
- Stoffler, D., Keil, K., Scott, E. R. D. (1991) Shock metamorphism of ordinary chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **55** (12), 3845–3867.
- Stoffler, D., Artemieva N. A., Wünnemann K., Reimold W. U., Jacob J., Hansen B. K., Summerson I. A. T. (2013) Ries crater and suevite revisited—Observations and modeling Part I: Observations. *Meteorit. & Planet. Sci.* **48** (4), 515–589.
- Trieloff M., Korochantseva E.V., Buikin A.I., Hopp J., Ivanova M.A., Korochantsev A.V. The Chelyabinsk meteorite: Thermal history and variable shock effects recorded by the 40Ar-39Ar system. *Meteorit. & Planet. Sci.* **53** (3), 343–358.

SHOCK-WAVE EXPERIMENT WITH THE CHELYABINSK LL5 METEORITE: EXPERIMENTAL PARAMETERS AND THE TEXTURE OF THE SHOCK-AFFECTED MATERIAL)

© 2019 E. V. Petrova^{a,*}, V. I. Grokhovsky^a, T. Kohout^b,
R. F. Muftakhetdinova^a, G. A. Yakovlev^a

¹Ural Federal University, Institute of Physics and Technology,
Russia, 620002 Ekaterinburg, Mira, 19/5

²Helsinki University, Faculty of Science,
Finland, 00014 Helsinki, Gustaf Hällströmin katu 2, PL64
e-mail: evgeniya.petrova@urfu.ru

Received: 16.01.2019

Received version received: 12.02.2019

Accepted: 15.02.2019

The shock experiment with Chelyabinsk LL5 light lithology material was performed as a spherical geometry shock. The material experienced shock and thermal metamorphism from the initial S3–4 up to complete melt stage. Temperature and pressure realized were estimated above 2000°C and 90 GPa. Textural shock effects were studied by the means of optical and electron microscopy. By the only experimental impact, all the range of the shock pressures and temperatures was realized. Four zones were revealed from the petrographic analysis: 1 – melt zone, 2 – melted silicates zone, 3 – black ring zone, 4 – weakly shocked initial material. Several features of the material texture were noted: displacement of the metal and troilite phases from the central melt zone; mixed lithology zone formation (light-colored chondrules within the silicate melt); dark-colored lithology ring formation; generation of radial-oriented shock veins. Thus, at the experimental fragment, four texture zones were formed. These zones correspond to the different lithology types of the Chelyabinsk LL5 meteorite, which could be found in different fragments of the meteoritic shower from UrFU collection. The results obtained prove that the shock wave loading experiment could be used for space shock modeling. Therefore, the processes of the small bodies of the Solar system could be experimentally modeled at the laboratory conditions.

Keywords: Chelyabinsk, ordinary chondrite, shock experiment, spherical shock, texture, shock metamorphism

(For citation: Petrova E.V., Grokhovsky V.I., Kohout T., Muftakhetdinova R.F., Yakovlev G.A. Shock-Wave Experiment with the Chelyabinsk LL5 Meteorite: Experimental Parameters and the Texture of the Shock-Affected Material). *Geokhimiya*. 2019;64(8):859–868. DOI: 10.31857/S0016-7525648859-868)