

ОБЛАЧНАЯ ЗОНА В МЕТЕОРИТНОМ МЕТАЛЛЕ КАК ИНДИКАТОР УДАРНЫХ И ТЕПЛОВЫХ СОБЫТИЙ

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

Уральский федеральный университет, Физико-технологический институт, Екатеринбург, Россия, gizrozka91@bk.ru

Изучение влияния ударных и тепловых эффектов на структуру метеоритов в космических условиях является непростой задачей, поскольку распределение температур и давлений в метеоритном веществе носит хаотический характер.

В процессе дифференциации вещества в родительских телах метеоритов сформировалась уникальная структура из металлических минералов триады Fe-Ni-Co. Основной отличительной особенностью, повлиявшей на её образование, является медленная скорость охлаждения расплавленного металла (порядка 1 К за миллион лет). Одним из важных составляющих наблюдаемой структуры является кайма из тетраэзнита (упорядоченная γ' -фаза Fe-Ni) вдоль границы с областями камасита и прилегающая к ней облачная зона – наноразмерные выделения тетраэзнита в окружении камасита ($\gamma + \alpha$) [Yang et al., 1996]. Предполагается, что подобная структура является результатом спинодального распада, что отражено в соответствующей области фазовой диаграммы Fe-Ni. По размерам высоконикелевых частиц в облачной зоне метеоритного металла можно определить металлографические скорости охлаждения при спинодальном распаде ниже $\sim 350^\circ\text{C}$ [Krot et al., 2012]. В последнее время ряд работ посвящен определению остаточного палеомагнетизма высоконикелевых частиц тетраэзнита в облачной зоне [Bryson et al., 2014; Blukis et al., 2020]. По наличию или отсутствию этой структуры в метеоритном металле можно оценить предельную температуру, до которой нагревалось взеземное вещество до попадания на Землю при ударном и/или термическом воздействии.

В данной работе были изучены фрагменты метеорита Сеймчан после ударного нагружения и нагрева до 600°C . Фрагмент из железокаменистой части метеорита Сеймчан был подвержен ударно-волновому нагружению сферически сходящимися волнами в Российском федеральном ядерном центре Всероссийском научно-исследовательском институте технической физики имени академика Е. И. Забабахина (г. Снежинск) в соответствии с методикой, описанной в [Kozlov & Zhukov, 1993]. Сечение шарообразного образца было исследовано с помощью растрового электронного микроскопа Zeiss Σ IGMA VP. В центральной части

этого шара области, содержащие зональный тэнит, найдены не были. Однако, в периферийной части их удалось обнаружить. В сложных многокомпонентных материалах наподобие метеоритного вещества локальный рост давления влечёт за собой и рост температуры. Известны случаи обнаружения облачной зоны в метеоритах, демонстрирующих свидетельства сильного ударного нагружения (> 13 ГПа). Можно предположить, что существуют пороговые значения давления и температуры, в результате превышения которых облачная зона может тем или иным образом трансформироваться, однако из анализа литературы по теме следует, что целенаправленные исследования изменений структуры облачной зоны до и после ударного нагружения не проводились.

Ранее было обнаружено, что облачная зона разрушается при нагреве до 700°C и выдержке в течение 6 часов, но сохраняется при той же продолжительности выдержки во время нагрева до 400°C [Brusnitsyna et al., 2020]. В данной работе два фрагмента палласита Сеймчан (PMG) из палласитовой и октаэдритовой частей метеорита были нагреты в вакуумной печи до температуры 600°C , степень вакуума – $1.9 \cdot 10^{-2}$ Па. Длительность изотермической выдержки составила 6 часов, охлаждение – вместе с печью.

После нагрева образцы были вновь отполированы и потравлены. Структура в образце из октаэдритовой части не претерпела видимых в оптический микроскоп изменений. В металлических минералах образца из палласитовой части наблюдается рекристаллизация камасита у границы камасит/силикат и на границе камасит/тэнит. С помощью электронной микроскопии было выявлено начало превращения в структуре облачной зоны в обоих образцах. Большая часть данной структуры не изменилась, однако присутствуют участки, в которых высоконикелевые частицы тетраэзнита объединяются. Локальный химический анализ не выявил изменения содержания никеля в образцах из палласитовой и октаэдритовой частей на трех участках: в камасите вблизи границы камасит/тэнит, в полосе тетраэзнита и в облачной зоне вблизи границы тетраэзнит/облачная зона. Результаты линейного картирования показали наличие M-профиля по никелю в образцах до и после нагрева.

Таким образом, в результате нагрева при температуре 600°C и выдержке в течение 6 часов было обнаружено начало превращения в структуре облачной зоны как в образце из палласитовой, так и из октаэдритовой частей метеорита Сеймчан. На основании этого можно предположить, что максимальная температура периферийной части шара после ударно-волнового нагружения не превышала 600°C, а структура зонального тэнита может являться дополнительным индикатором максимальных температуры и давления, испытанных метеоритом в космических условиях.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта № FEUZ-2020-0059 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Blukis R., Pfau B., Günther C. M., Hessing P., Eisebitt S., Einsle J. and Harrison R. J. Nanoscale Imaging of High-Field Magnetic Hysteresis in Meteoritic Metal Using X-Ray Holography // *Geochem., Geoph., Geosyst.* 2020. P. 21.
2. Brusnitsyna E.V., Muftakhetdinova R.F., Yakovlev G.A., Tyutrina T.V. Grokhovsky V.I. Annealing of the Seymchan meteorite at the temperature of 700°C // *AIP Conference Proceedings*. 2020. No. 2313. P. 060002.
3. Bryson J.F.J., Nathan S.C., Kasama T., Harris R.J. Nanomagnetic intergrowths in Fe–Ni meteoritic metal: The potential for time-resolved records of planetesimal dynamo fields // *Earth and Planet. Sci. Let.* 2014. V. 388. P. 237–248
4. Kozlov E.A., Zhukov A.V. // *High Pressure Science and Technology*, S.C. Schmidt, J.W. Shaner, G.A. Samara, M. Ross (eds), American Institute of Physics, New York, 1993. P. 977–980.
5. Krot T.V., Goldstein J.I., Scott E.R.D., Wakita S. Thermal histories of H3-6 chondrites and their parent asteroid from metallographic cooling rates and cloudy taenite dimensions // *Meteorit. & Planet. Sci.* 2012. V. 47A. P. 5372.
6. Yang C.-W., Williams D.B., Goldstein J.I. A revision of the Fe–Ni phase diagram at low temperature // *J. Phase Equil.* 1996. V. B17. P. 522–531.