# ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРОВ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА УДАРНО-ПРЕОБРАЗОВАННЫХ ТИТАНИТОВ КАРСКОЙ АСТРОБЛЕМЫ

## Чебыкин Н.С., Замятин Д.А.

Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия, tchebykinnikolai@yandex.ru

При образовании метеоритных кратеров реализуются сверхвысокие давления и температуры. В результате ударных (импактных) процессов происходит мгновенное повышение температуры (до 10000 К) и давления (до 300 ГПа), что сопровождается плавлением и испарением горных пород, структурными и химическими преобразованиями минералов, их деформациями и стеклованием. Обнаружение такого рода изменений в минералах является индикатором условий импактного метаморфизма.

В результате ударных воздействий до давлений 20 ГПа в акцессорном минерале титаните (CaTiSiO<sub>5</sub>) могут быть диагностированы дислокации, полосы деформаций, механические двойники и гранулярное внутреннее строение [Timms et al., 2019]. При нагревании в статических условиях до ~500 К титанит претерпевает фазовый переход структуры из пространственной группы P2/а в A2/а (или C2/с), преимущественно по механизму смещения Ti внутри октаэдров TiO<sub>6</sub>. Ударные структурно-химические преобразования титанита исследованы слабо [Timms et al., 2019].

В Карской астроблеме были выделены три типа титанитов по их внутреннему строению и деформационным микроструктурам [Chebykin, Zamyatin, 2023]. Определение механизмов и условий образования выделенных типов титанита Карской астроблемы актуально для разработки ударных термобарометров на основе титанита.

**Цель работы** – выявление структурно-химических особенностей титанитов Карской астроблемы по данным спектроскопии комбинационного рассеяния (КР).

#### Оборудование и образцы

Образцы отобраны с обнажения на р. Нганорахаяха в центральной части кратера Кара (хр. Пай-Хой, Урал). Из них изготовлены плоско-полированные шлифы.

С использованием сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA LMS, оснащенного приставкой Oxford Instruments EDS X-max80, зарегистрированы панорамные BSE-изображения и диагностированы зерна титанита, получены детальные BSE-изображения отдельных зерен. Спектры комбинационного рассеяния регистрировались с использованием КР-спектрометра Horiba LabRam HR800 Evolution в диапазоне 150–1100 см<sup>-1</sup>. Спектрометр оснащен микроскопом Olympus BX-FM, He-Ne-лазером 633 нм и дифракционной решеткой 600 штр/мм. Обработка спектров производилась с использованием программного обеспечения LabSpec путем вычитания фона и применения функции шумоподавления.

## Результаты и обсуждение

Титаниты I группы содержат плоские трещины (рис. 1 а); II группы – признаки оплавления, проявляющуюся в округлых формах (рис. 1 б); в титанитах III группы (рис. 1 в) наблюдаются округлые трещины, формирующие глобулярную структуру. Вероятно, первые образовались в результате дробления; вторые – плавления, а третьи – частичного распада или фазового перехода с изменением объема.

КР-спектры выделенных групп значительно отличаются друг от друга (рис. 1 г). КР-спектры титанитов можно разделить на два диапазона 100-400 см<sup>-1</sup>, который включает моды колебаний решетки, и 400-1100 см<sup>-1</sup>, который включает моды внутренних колебаний SiO<sub>4</sub> и растяжения Ті-О [Панкрушина и др., 2019]. Спектры титанитов І группы имеют типичный для хорошо кристаллизованных титанитов вид. Для титанитов II группы характерны значительные смещения пиков относительно титанита I группы: пик 250 см<sup>-1</sup> смещается на ~5 см<sup>-1</sup> в область больших частот; пик 545 см<sup>-1</sup> смещается на 6 см<sup>-1</sup> в положение 551 см<sup>-1</sup>, при этом полуширина уменьшается с 38 до 28 см-1; но наибольшие изменения наблюдаются для линии 603 см<sup>-1</sup>, которая смещается на 21 см<sup>-1</sup> и находится в положении 624 см<sup>-1</sup>, при этом значительно уширяется с 38 до 61 см<sup>-1</sup>. Основные пики в спектрах титанитов Ш группы имеют близкие положения и полуширину к пикам образцов I группы, но значительно меньшее отношение сигнал/фон, а также дополнительный пик ~684 см<sup>-1</sup> и большие ширины линий.

Положения и ширины КР-спектров титанита существенно зависят от содержания примесных элементов и уровня радиационного повреждения [Щапова и др., 2020]. Согласно данным электронно-зондового анализа (ЭЗМА) [Чебыкин, Замятин,



Рис. 1. ВSE-изображения и КР-спектры титанитов. **a** – I группы (синими стрелками показаны трещины), **б** – II группы (зелеными стрелками показаны признаки плавления) и **в** – III группы (красными стрелкам показаны глобулярные структуры), **г** – соответствующие КР-спектры

2023] І–ІІІ типы титанитов Карской астроблемы имеют близкий уровень содержания примесных элементов, неравномерно распределенных внутри зерен. На основании работы [Zhang et al., 2013] можно сделать вывод, что титаниты I группы имеют высокую степень кристалличности, титаниты II группы являются слабо аморфизованными, а III – сильно аморфными. Несмотря на высокие РТ-условия, фаза титанита со структурой А2/а не обнаружена – линия 571 см<sup>-1</sup>, соответствующая этой фазе, отсутствует.

Учитывая, что содержание радиоактивных элементов по данным ЭЗМА ниже пределов обнаружения (850 и 560 ppm для U и Th, соответственно) [Чебыкин, Замятин, 2023], можно предполагать, что нарушение степени кристалличности обусловлено ударными процессами, а их различие – неоднородностью локальных условий.

Работа выполнена в ЦКП «Геоаналитик» при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № АААА-А19-119071090011-6 и 123011800012-9. Авторы выражают благодарность Михалевскому Г.Б. за регистрацию КР-спектров.

### ЛИТЕРАТУРА

 Панкрушина Е.А. и др. Статистические подходы к обработке массивов данных в рамановской термоспектроскопии минералов (на примере титанита) // Металлогения древних и современных океанов. 2019. №. 1. С. 293–298.

- 2. Чебыкин Н.С., Замятин Д.А. Изменение химического состава минерала титанита (CaTiSiO<sub>5</sub>) в условиях высоких ударных давлений (метеоритный кратер Кара, Урал) // ХХХІІ Зимняя школа по химии твердого тела. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2023. С. 91–93. https://elar.urfu.ru/handle/10995/122108
- Щапова Ю.В. и др. Минералы-концентраторы d- и f- элементов: локальные спектроскопические и ЛА-ИСП-МС исследования состава, структуры и свойств, геохронологические приложения. Ред. Вотяков С.Л. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2020. 424 с.
- Chebykin N.S., Zamyatin D.A. The first study of shocked titanite from Kara impact structure (Ural, Russia). The next 125 years of Earth Sciences. Geocongress. Stellenbosch, 2023 (in press).
- Timms N.E. et al. New shock microstructures in titanite (CaTiSiO<sub>5</sub>) from the peak ring of the Chicxulub impact structure, Mexico //Contributions to Mineralogy and Petrology. 2019. V. 174. P. 1–23.
- Zhang M. et al. Intermediate structures in radiation damaged titanite (CaTiSiO<sub>5</sub>): a Raman spectroscopic study // Journal of Physics: Condensed Matter. 2013. V. 25. P. 1–12.