

ИМПАКТИТ ЯНИСЬЯРВИ: ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДАМИ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДИФРАКЦИИ, РАМАНОВСКОЙ И МЕССБАУЭРОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Макимова А.А.^{1,2}, Замятина Д.А.^{1,2}, Замятин Д.А.^{1,2}, Чукин А.В.², Оштрах М.И.²

¹Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия, a.a.maksimova0402@yandex.ru

²Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Комплексные исследования микроструктуры и химического состава импактитов сохраняют свою актуальность, так как позволяют получить новые данные о физико-химических процессах зарождения Солнечной системы, а также последующей эволюции вещества в космическом пространстве. Импактиты – породы, образующиеся в результате соударений малых космических тел с поверхностью планеты (например, астероида с Землей). Процесс пороодообразования происходит на поверхности планеты и включает дробление, плавление и испарение вещества, а затем конденсацию пара, кристаллизацию, частичную перекристаллизацию, перемещение и отложение продуктов дробления. Исследования таких ударных структур позволяют определять характер ударного взаимодействия с Землей, описывать процессы, происходившие с их родительскими телами, искать новые концепции образования кратеров на Земле, получать полезную информацию о строении и эволюции литосферы, а также решать важные вопросы образования планет Солнечной системы. В настоящей работе проведено исследование импактита Янисьярви методами оптической микроскопии, электронно-зондового микроанализа (ЕРМА), рамановской спектроскопии, а также рентгеновской дифракции и мессбауэровской спектроскопии.

Для исследования был выбран образец импактита Янисьярви размером 5×3×4 см с мыса Leppiniemi (озеро Янисьярви, Карелия). Прозрачно-полированный шлиф импактита был подготовлен для проведения анализа методами оптической микроскопии, электронно-зондового микроанализа и рамановской спектроскопии. Порошок импактита Янисьярви весом 600 мг был приготовлен для исследования методами рентгеновской дифракции и мессбауэровской спектроскопии. После измерения образца на рентгеновском дифрактометре порошок наклеивали на не содержащую железа алюминиевую фольгу диаметром 20 мм толщиной ~8 мг Fe/см² для измерения мессбауэровского спектра. Фотографии микроструктуры импактита получены с помощью микроскопа Olympus BX-41. ЕРМА проводился с использованием электронно-зондового микроанализа

затора Cameca SX-100 с ускоряющим напряжением 15 кВ и током 40 нА. Рамановские спектры измеряли на спектрометре Horiba LabRAM HR800 Evolution с лазерным возбуждением на 633, 514, 488 нм. Рентгеновская дифрактограмма измерялась с помощью порошкового дифрактометра XRD-7000 (Shimadzu), работающего при 40 кВ и 30 мА с излучением CuK_α с использованием графитового монохроматора. Мессбауэровский спектр импактита Янисьярви был измерен с помощью автоматизированного прецизионного мессбауэровского комплекса, созданного на базе спектрометра CM-2201 с высоким скоростным разрешением, в геометрии пропускания с движущимся поглотителем при 295 К и регистрацией в 4096 каналов. Измерение проводилось в течение 12 дней с набором статистики ~3.7×10⁵ импульсов в канале и соотношением сигнал/шум 71.

Анализ оптических изображений импактита Янисьярви и электронно-зондовый микроанализ показали наличие кордиерита (Mg,Fe)₂Al₄Si₅O₁₈, шамозита (Fe²⁺,Mg)₅Al(AlSi₃O₁₀)(OH)₈, кварца SiO₂, санидина K(AlSi₃)O₈ и плагиоклаза NaAlSi₃O₈–CaAl₂Si₂O₈. Кроме того, как акцессорный минерал в матрице наблюдался ильменит FeTiO₃.

Спектры комбинационного рассеяния шамозита, ильменита и кордиерита в шлифе импактита Янисьярви показаны на рис. 1. Спектр комбинационного рассеяния шамозита указывает на симметричное растяжение октаэдрических и тетраэдрических позиций в шамозите. Полоса около 543 см⁻¹ относится к изгибу (Fe,Mg)–O–Si или Al–O–Si. Рамановские пики в области 674 см⁻¹ относятся к изгибу (SiSi)O–OH. Рамановский спектр ильменита показывает трансляции октаэдров Ti⁴⁺O₆ относительно катионов Fe²⁺ и изгибные движения O–Ti⁴⁺–O, а также валентные движения Ti⁴⁺–O. Рамановский спектр кордиерита показывает, что среднее содержание железа и магния в кордиерите примерно одинаково с небольшим преобладанием Fe.

Анализ рентгеновской дифрактограммы образца импактита Янисьярви показал наличие следующих фаз: ортоклаз (санидин) K(AlSi₃)O₈ (31.7 вес. %), тридимит SiO₂ (17.5 вес. %), кордиерит (Mg, Fe)₂Al₄Si₅O₁₈

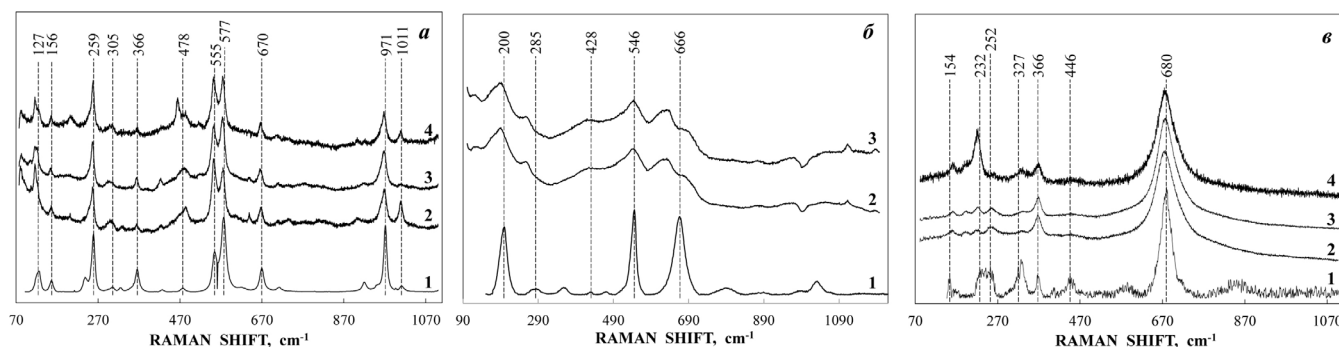


Рис. 1. Рамановские спектры импактита Янисъярви: **а** – кордиерит (1 – спектр кордиерита R040082 из базы данных [Lafuente et al., 2015], 2, 3 и 4 – спектры в выбранных точках на поверхности исследуемого образца), **б** – шамозит (1 – спектр шамозита R060188 из базы данных [Lafuente et al., 2015], 2 и 3 – спектры в выбранных точках на поверхности исследуемого образца), **в** – ильменит (1 – спектр ильменита R060149 из базы данных [Lafuente et al., 2015], 2, 3 и 4 – спектры в выбранных точках на поверхности исследуемого образца). Рамановские сдвиги для выбранных спектральных пиков приведены для минералов, не подвергнутых удару, из базы данных [Lafuente et al., 2015]

(17 вес. %), кристобалит SiO_2 (10.4 вес. %), кварц SiO_2 (9.9 вес. %), альбит $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ (9.7 вес. %), шамозит $(\text{Mg}_{1.5}\text{Fe}_{7.9}\text{Al}_{2.6})(\text{Si}_{6.2}\text{Al}_{1.8}\text{O}_{20})(\text{OH})_{16}$ (3 вес. %), ильменит FeTiO_3 (0.4 вес. %), титанит $\text{CaTiO}(\text{SiO}_4)$ (0.2 вес. %) и ферригидрит $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (0.2 вес. %). Параметры элементарной ячейки для орторомбического кордиерита (пространственная группа *Ccct*) были определены как $a = 17.177$ (2), $b = 9.788$ (1), $c = 9.318$ Å (1), а для моноклинного шамозита (пространственная группа *C2/m*) были оценены как $a = 5.270$ (5), $b = 9.424$ (8), $c = 14.50$ Å (2).

Мессбауэровский спектр образца импактита Янисъярви, измеренный с высоким скоростным разрешением при комнатной температуре, показан на рис. 2. Спектр был аппроксимирован суперпозицией семи квадрупольных дублетов, которые были связаны с ядрами ^{57}Fe в кордиерите [Khomenko et al., 2001; Garcia et al., 2010], шамозите (позиции M1, M2, M3 и M4) [Lougear et al., 2000; Aja, Dyar, 2002], ильмените [Wu et al., 2010; Saensunon et al., 2008] и ферригидрите [Murad et al., 2010]. Параметры сверхтонкой структуры компонент спектра, соответствующих шамозиту,

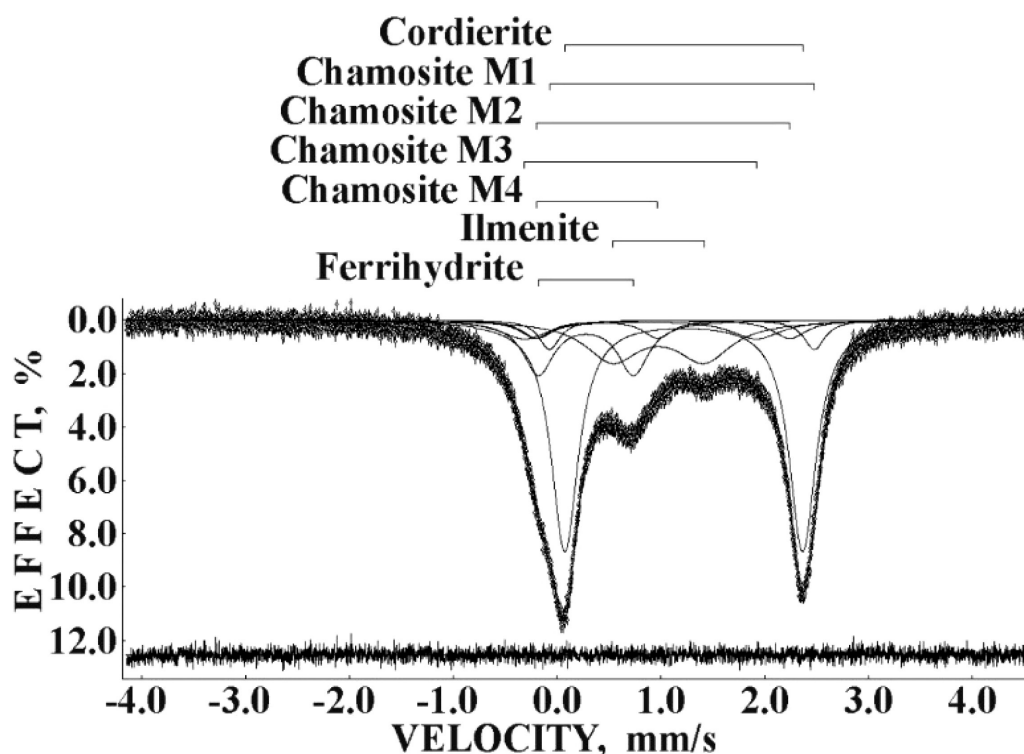


Рис. 2. Мессбауэровский спектр импактита Янисъярви, измеренный при $T=295$ К. Дифференциальный спектр приведен под мессбауэровским спектром

указывают на то, что в позициях M1, M2 и M3 находятся катионы Fe^{2+} , а в позиции M4 присутствуют катионы Fe^{3+} . Наличие ферригидрита подтверждено данными рентгеноструктурного анализа. Если принять одинаковую вероятность эффекта Мессбауэра (f -фактор) для всех выявленных железосодержащих фаз, можно приблизительно оценить относительное содержание железа в этих фазах, используя значения относительных площадей компонент спектров: ~50% в кордиерите, ~20% в шамозите, ~17 % в ильмените и ~13% в ферригидрите. В шамозите находится 80.6% катионов Fe^{2+} и 19.4% катионов Fe^{3+} .

Таким образом, в данном исследовании выявлено, что импактит Янисъярви содержит такие минералы, как ортоклаз (санидин), тридимит, кристобалит, кварц, альбит, титанит, кордиерит, шамозит, ильменит и ферригидрит. Кордиерит во время удара образовывался при температурах до 700–1400 °C. Наличие в расплаве незначительного количества Ti способствовало образованию ильменита. Давление при ударе близко к ранее полученным значениям 13–25 ГПа [Fel'dman et al., 2006] и составляет 10–20 ГПа. Образование шамозита и ферригидрита, вероятно, связано с постударными гидротермальными изменениями.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проекты № FEUZ-2023-0013 и № АААА-А19-119071090011-6, А.А.М., Д.А.З., Д.А.З. и М.И.О. поддержаны Программой развития УрФУ «Приоритет-2030».

ЛИТЕРАТУРА

1. Aja S.U., Dyar M.D. The stability of Fe–Mg chlorites in hydrothermal solutions – I. Results of experimental investigations // App. Geochem. 2002. V. 17. P. 1219–1239.
2. Fel'dman V.I., Sazonova L.V., Kozlov E.A. Shock metamorphism of some rock-forming minerals: Experimental results and natural observations // Petrology. 2006. V. 14. P. 540–566.
3. Garcia E., Gancedo J.R., Gracia M. Effect of cycled combustion ageing on a cordierite burner plate // Mater. Character. 2010. V. 61. P. 1147–1156.
4. Khomenko V.M., Langer K., Geiger C.A. Structural locations of the iron ions in cordierite: a spectroscopic study // Contrib. Mineral. Petrol. 2001. V. 141. P. 381–396.
5. Lafuente B., Downs R.T., Yang H., Stone N. The power of databases: the RRUFF project. In Highlights in Mineralogical Crystallography (Eds. Armbruster T., Danisi R.M.). Berlin: De Gruyter, 2015. P. 1–30.
6. Lougear A., Grodzicki M., Bertoldi C., Trautwein A.X., Steiner K., Amthauer G. Mössbauer and molecular orbital study of chlorites // Phys. Chem. Minerals. 2000. V. 27. P. 258–269.
7. Murad E. Mössbauer spectroscopy of clays, soils and their mineral constituents // Clay Miner. 2010. V. 45. P. 413–430.
8. Saensunon B., Stewart G.A., Pax R. A combined ^{57}Fe –Mössbauer and X-ray diffraction study of the ilmenite reduction process in a commercial rotary kiln // Int. J. Miner. Process. 2008. V. 86. P. 26–32.
9. Wu X., Qin S., Dubrovinsky L. Structural characterization of the FeTiO_3 – MnTiO_3 solid solution // J. Solid State Chem. 2010. V. 183. P. 2483–2489.