

УДК 552.16:552.18+543.424.2

ПРИМЕНЕНИЕ РАМАНОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ВКЛЮЧЕНИЙ КВАРЦА В ГРАНАТЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДАВЛЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ ПОРОД БЕЛОМОРСКОЙ ПРОВИНЦИИ ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА)

А. А. Ковальчук*, **А. В. Кервинен**

*Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910), *kovalchuk_aa@krc.karelia.ru*

Приведен пример использования рамановского геобарометра «кварц-в-гранате» для расчета давления при образовании метаморфических пород массива Боярский Беломорской провинции. Метод основан на определении остаточных деформаций во включениях, возникающих при подъеме горной породы из глубины к поверхности. Деформации возникают из-за разницы в упругих свойствах минерала-хозяина и включения. Для расчета остаточного напряжения методом упругой деформации получены рамановские спектры включений кварца и свободного кварца в матрице и вычислены смещения основных пиков кварца (464, 206 и 128 см⁻¹). После определения деформаций полученные значения использованы для расчета давления, при котором включения были захвачены минералом-хозяином. Изученный образец габбро-пегматита содержит порфириобласты граната размером до 1 мм, насыщенные включениями кварца размером от 5 до 65 мкм. Проанализировано 15 включений кварца диаметром 20–65 мкм и 5 свободных зерен кварца в матрице. Давления захвата рассчитывались в заданном интервале температур 200–1300 °С с шагом 10 °С. Температура кристаллизации кварца в гранате определялась с помощью термометра Ti-in-Qz и составила 725–902 °С, что соответствует давлению 8,9–13,6 кбар, рассчитанному методом рамановской геобарометрии «кварц-в-гранате». Температурный интервал кристаллизации, полученный с использованием классического Grt-Amph геотермометра, составил 530–580 °С, что соответствует рассчитанному давлению 5,2–6,0 кбар. Полученные значения давления согласуются с ранее проводимыми термобарометрическими оценками условий метаморфизма габбро-пегматитов и вмещающих их метагаббро.

Ключевые слова: гранат; включения кварца; рамановская спектроскопия; термобарометрия; Беломорская провинция

Для цитирования: Ковальчук А. А., Кервинен А. В. Применение рамановской спектроскопии включений кварца в гранате для оценки давления (на примере пород Беломорской провинции Фенноскандинавского щита) // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 2. С. 111–115. doi: 10.17076/geo2235

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке темы НИР ИГ КарНЦ РАН FMEN-2023-0009.

A. A. Kovalchuk*, A. V. Kervinen. APPLICATION OF RAMAN SPECTROSCOPY OF QUARTZ INCLUSIONS IN GARNET FOR PRESSURE ASSESSMENT (CASE STUDY OF THE BELOMORIAN PROVINCE, FENNOSCANDIAN SHIELD)

*Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *kovalchuk_aa@krc.karelia.ru*

This paper presents an example of using a quartz-in-garnet Raman geobarometer to calculate the pressure during the formation of metamorphic rocks in the Boyarsky Massif of the Belomorian Province. The method is based on determining residual strains in inclusions that arise during rock ascent from depth to the surface. These strains arise due to differences in the elastic properties of the host mineral and the inclusion. To calculate residual stress using the elastic strain method, Raman spectra of quartz inclusions and free quartz in the matrix were obtained, and the shifts of the main quartz peaks (464, 206, and 128 cm^{-1}) were calculated. After determining the strains, their values were used to calculate the pressure at which the inclusions were trapped by the host mineral. The studied gabbro-pegmatite sample contains garnet porphyroblasts up to 1 mm in size, saturated with quartz inclusions ranging from 5 to 65 μm in size. Fifteen quartz inclusions, 20–65 μm in diameter, and five free quartz grains in the matrix were analyzed. The trapping pressures were calculated over a specified temperature range of 200–1300 $^{\circ}\text{C}$ with a 10 $^{\circ}\text{C}$ increment. The temperature of quartz crystallization in garnet, determined using a Ti-in-Qz thermometer, was 725–902 $^{\circ}\text{C}$, corresponding to a pressure of 8.9–13.6 kbar calculated using quartz-in-garnet Raman geobarometry. The crystallization temperature range, obtained using a classic Grt-Amph geothermometer, was 530–580 $^{\circ}\text{C}$, corresponding to an estimated pressure of 5.2–6.0 kbar. These pressure values are consistent with previously conducted thermobarometric assessments of the conditions of metamorphism of gabbro-pegmatites and the metagabbros enclosing them.

Keywords: garnet; quartz inclusions; Raman spectroscopy; thermobarometry; Belomorian Province

For citation: Kovalchuk A. A., Kervinen A. V. Application of Raman spectroscopy of quartz inclusions in garnet for pressure assessment (case study of the Belomorian Province, Fennoscandian Shield). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 2. P. 111–115. doi: 10.17076/geo2235

Funding. The study was funded under state assignment to the Institute of Geology KarRC RAS, research theme FMEN-2023-0009.

Введение

Изучение включений в минералах представляет собой важный способ выяснения P-T-условий образования самих минералов. Одним из перспективных методов оценки P-T-условий стала рамановская спектроскопия, которая позволяет не только идентифицировать минеральные фазы внутри минерала-хозяина, но и оценить уровень остаточных напряжений в захваченных включениях.

При подъеме горной породы из глубины к поверхности появляется разница в упругих свойствах минерала-хозяина и включения, вызывающая, в свою очередь, образование остаточных деформаций. Изменения в полосах комбинационного рассеяния напрямую связаны с деформацией элементарной ячейки включения из-за объемных изменений хозяина и включения.

Рамановские сдвиги позволяют количественно оценить величину сжатия и растяжения включения, обеспечивая оценку давления захвата минерала.

Упругая геобарометрия, применяемая к системам «хозяин – включение», является дополнительным методом определения P-T-условий метаморфизма. Этот метод дает информацию о возможных условиях захвата, и для определения давления должно быть известно значение температуры, при которой произошел захват включения.

Материалы и методы

В настоящей работе исследован образец габбро-пегматита из массива Боярский, содержащий порфириобласты граната размером до 1 мм, насыщенные включениями кварца размером от 5 до 50 мкм.

Массив Боярский имеет лополитоподобную форму и относится к числу крупных интрузий Беломорского региона. Его породы были метаморфизованы, однако внутренняя структура достаточно хорошо сохранилась, что делает этот объект важным для изучения условий формирования габброноритового комплекса Беломорской провинции. Внутри массива присутствуют крупные ксенолиты мелкозернистых пород, интерпретируемых как фрагменты закалочной зоны. Первоначальные границы массива претерпели значительные изменения в результате последующих тектонических и метаморфических воздействий. Главные разновидности пород массива – троктолиты и габброиды, включая меланократовые и лейкократовые разновидности. Габбро-пегматиты установлены в виде небольших линзовидных тел в южной части массива и сохранили массивные текстуры и реликты габбро-офитовой структуры.

Породы состоят преимущественно из плагиоклаза и пироксена. Химический состав пород варьируется от ультраосновных до высокомагнезиальных разновидностей. Наблюдается четкий тренд уменьшения концентрации SiO_2 , TiO_2 , CaO и Al_2O_3 с ростом MgO , тогда как концентрация Fe_2O_3 возрастает вместе с содержанием магния. Эти особенности указывают на доминирование процессов кристаллизации магмы с участием оливинового контроля.

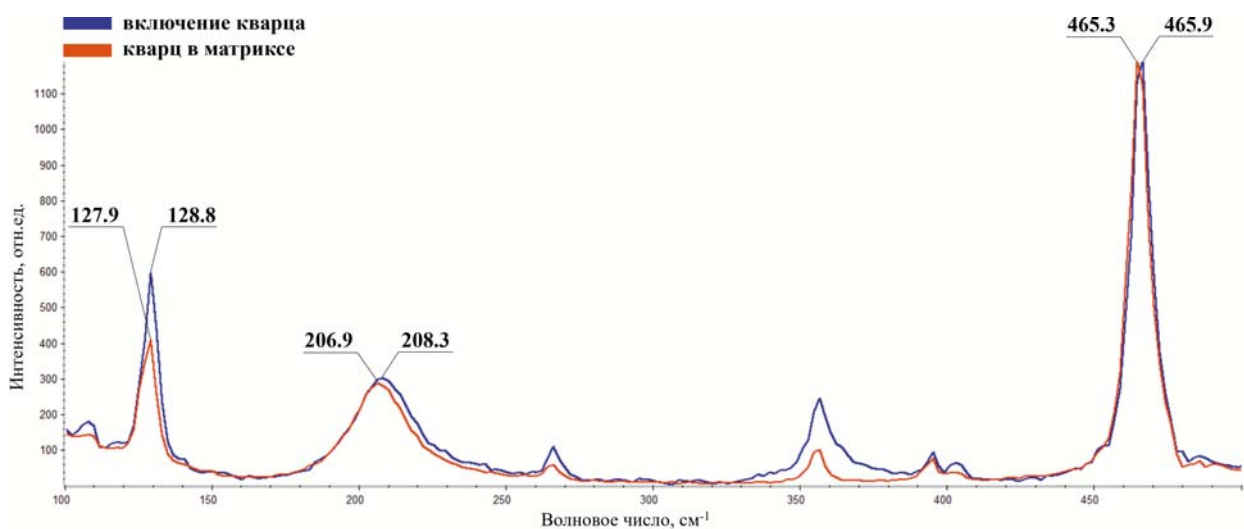
Для расчета остаточного напряжения методом упругой деформации [Angel et al., 2018; Murri et al., 2018] были получены рамановские спектры включений кварца и свободного кварца в матрице и вычислены смещения основных пиков кварца (464, 206 и 128 cm^{-1}).

После определения напряжений (деформаций) полученные значения использованы в программе EntraPT [Mazzucchelli et al., 2021] для расчета давления и температуры, при которых включения были захвачены минералом-хозяином.

Рамановские спектры получены на спектрометре Horiba Jobin-Yvon LabRam HR800 с микроскопом Olympus BX41 (Ресурсный центр СПбГУ «Геомодель»). Измерения проводились при длине волны излучения 532 нм, спектральный диапазон 70–1100 cm^{-1} , накопление спектра в течение 30 секунд, калибровка спектрометра проводилась по спектральной линии кремния 520,7 cm^{-1} , инструментальная точность определения положения пиков составляла ~ 0,2 cm^{-1} . Измерения проводились в центральной точке кварцевого включения, положение пиков кварца определялось путем аппроксимации рамановского спектра в программе Omnic (Thermo Scientific). Изменения в положениях пиков интерпретировались с применением тензоров Грюнайзена фонной моды кварца [Murri et al., 2018].

Результаты

Проанализированы шесть зерен граната с общим числом включений кварца в них – 15 и пять свободных зерен кварца в матрице. Размер включений 20–65 мкм. Для значительной части включений кварца в гранате сдвиг полос рамановского спектра (рис.) по отношению к спектру зерна кварца в матрице варьирует от 0,4 до 1,4 cm^{-1} . Включения, дающие сдвиг менее 0,4 cm^{-1} , не рассматривались для дальнейшего расчета напряжений.



Рамановские спектры кварца в матрице и кварцевого включения
Raman spectra of quartz in matrix and quartz inclusion

Давления захвата рассчитывались в заданном интервале температур 200–1300 °С с шагом 10 °С. Максимальное рассчитанное давление составило 20,4 кбар при 1080 °С.

Температура кристаллизации кварца в гранате, определенная с помощью термометра Ti-in-Qz [Osborne et al., 2022], составляет 725–902 °С, что соответствует давлению 8,9–13,6 кбар, рассчитанному методом рамановской геобарометрии «кварц-в-гранате». Содержание Ti определялось методом вторично-ионной масс-спектрометрии (SIMS) в Институте микроэлектроники РАН (г. Ярославль). Концентрации Ti в кварце (кварц в гранате, несвободный) – 4,3–24,9 ppm.

Значения температур, полученные с использованием классического Grt-Amph геотермометра [Ravna, 2000], составляют 530–580 °С. Рассчитанные давления для данного температурного интервала составили 5,2–6,0 кбар.

По ассоциации $Spx+Hbl+Pl+Qz+Grt$ в метаморфизованных габбро-пегматитах и вмещающих их метагаббро массива Боярский установлены [Азимов и др., 2021] PT-значения в диапазоне 580–760 °С и 7–12 кбар. Рассчитанные методом рамановской геобарометрии значения давления составили 6,0–9,7 кбар в аналогичном интервале температур. Некоторое занижение полученных значений может быть связано со вскрытостью исследованных зерен граната.

Заключение

Рамановская термобарометрия может выступать дополнительным средством оценки условий кристаллизации минералов, независимо от химического равновесия, дополняя традиционные методы термобарометрии. Для получения надежных оценок давления методом рамановской геобарометрии «кварц-в-гранате» требуется тщательно выбирать исследуемые включения. Частично вскрытые включения обладают меньшим напряжением, чем изолированные.

Значения давления, рассчитанные методом рамановской термобарометрии, согласуются с ранее проводимыми термобарометрическими оценками условий метаморфизма пород массива Боярский.

Литература

Азимов П. Я., Степанова А. В., Бабарина И. И., Кервинен А. В., Степанов В. С. Реликтовый палеопротерозойский высокобарный гранулитовый

метаморфизм в метабазах Беломорской провинции Фенноскандинавского щита как индикатор условий пика коллизии в лапландско-кольском орогене: Боярский габбронорит-троктолитовый массив // Петрология и геодинамика геологических процессов: Тезисы докл. Всерос. конф. (Иркутск, 06–13 сент. 2021 г.). Иркутск, 2021. Т. 1. С. 15–18.

Angel R. J., Murri M., Mihailova B., Alvaro M. Stress, strain and Raman shifts // *Zeitschrift für Kristallographie-Crystalline Materials*. 2018. Vol. 234, no. 2. P. 129–140. doi: 10.1515/zkri-2018-2112

Mazzucchelli M. L., Angel R. J., Alvaro M. EntraPT: An online platform for elastic geothermobarometry // *Am. Mineral*. 2021. Vol. 106, no. 5. P. 830–837. doi: 10.2138/am-2021-7693CCBYNCND

Murri M., Mazzucchelli M. L., Campomenosi N., Korsakov A. V., Prencipe M., Mihailova B. D., Scambelluri M., Angel R. J., Alvaro M. Raman elastic geobarometry for anisotropic mineral inclusions // *Am. Mineral*. 2018. Vol. 103. P. 1869–1872. doi: 10.2138/am-2018-6625CCBY

Osborne Z. R., Thomas J. B., Nachlas W. O., Angel R. J., Hoff C. M., Watson E. B. TitanQ revisited: expanded and improved Ti-in-quartz solubility model for thermobarometry // *Contrib. Mineral. Petr.* 2022. Vol. 177. Art. 31. doi: 10.1007/s00410-022-01896-8

Ravna E. K. Distribution of Fe²⁺ and Mg between coexisting garnet and hornblende in synthetic and natural systems: an empirical calibration of the garnet-hornblende Fe–Mg geothermometer // *Lithos*. 2000. Vol. 53, no. 3. P. 265–277. doi: 10.1016/S0024-4937(00)00029-3

References

Angel R. J., Murri M., Mihailova B., Alvaro M. Stress, strain and Raman shifts. *Zeitschrift für Kristallographie-Crystalline Materials*. 2018;234(2):129–140. doi: 10.1515/zkri-2018-2112

Azimov P. Ya., Stepanova A. V., Babarina I. I., Kervinen A. V., Stepanov V. S. The relic Paleoproterozoic high-pressure granulitic metamorphism in metabasites of the Belomorian Province of the Fennoscandian Shield as indicator of the metamorphic peak conditions during collision in the Lapland-Kola orogen: Boyarsky gabbronorite-troctolite massif. *Petrologiya i geodinamika geologicheskikh protsessov: Tezisy dokl. Vseros. konf. (Irkutsk, 06–13 sent. 2021 g.) = Petrology and geodynamics of geological Processes: Proceedings of the All-Russian conf. (Irkutsk, Sept. 6–13, 2021)*. Irkutsk; 2021. P. 15–18. (In Russ.)

Mazzucchelli M. L., Angel R. J., Alvaro M. EntraPT: An online platform for elastic geothermobarometry. *Am. Mineral*. 2021;106(5):830–837. doi: 10.2138/am-2021-7693CCBYNCND

Murri M., Mazzucchelli M. L., Campomenosi N., Korsakov A. V., Prencipe M., Mihailova B. D., Scambelluri M., Angel R. J., Alvaro M. Raman elastic geobarometry for anisotropic mineral inclusions. *Am. Mineral*. 2018;103:1869–1872. doi: 10.2138/am-2018-6625CCBY

Osborne Z. R., Thomas J. B., Nachlas W. O., Angel R. J., Hoff C. M., Watson E. B. TitaniQ revisited: expanded and improved Ti-in-quartz solubility model for thermobarometry. *Contrib. Mineral. Petr.* 2022;177:31. doi: 10.1007/s00410-022-01896-8

Ravna E. K. Distribution of Fe²⁺ and Mg between coexisting garnet and hornblende in synthetic and natural systems: an empirical calibration of the garnet-hornblende Fe–Mg geothermometer. *Lithos.* 2000;53(3): 265–277. doi: 10.1016/S0024-4937(00)00029-3

*Поступила в редакцию / received: 14.10.2025; принята к публикации / accepted: 23.12.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.*

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Ковальчук Анна Аркадьевна

канд. техн. наук, старший научный сотрудник

e-mail: kovalchuk_aa@krc.karelia.ru

Кервинен Анна Валерьевна

научный сотрудник

e-mail: kervinen@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Kovalchuk, Anna

Cand. Sci. (Tech.), Senior Researcher

Kervinen, Anna

Researcher