

Состав флюидных включений в минералах корундсодержащих и вмещающих пород проявления Хитоостров (Фенноскандинавский щит)

Акимова Е.Ю. 

Институт наук о Земле СПбГУ, Санкт-Петербург, e.akimova@spbu.ru

Аннотация. Изучены флюидные включения в минералах корундсодержащих и вмещающих пород проявления Хитоостров (Фенноскандинавский щит): гранате, кварце, корунде, кианите, плагиоклазе. Фазовый состав флюидных включений определен при помощи рамановской спектроскопии. Особое внимание уделено водно-солевым включениям. Состав и концентрация солей в них определены с использованием микротермометрии. Исходя из полученных данных по составу флюидных включений, мы можем предполагать, что в равновесии с минералами корундсодержащих метасоматитов находился углекислотно-водный флюид, содержащий хлориды Ca и Na. Сходство солевого состава флюидных включений в корундсодержащих и вмещающих породах свидетельствует о том, что эти породы формировались в едином процессе (свекофеннский этап регионального метаморфизма). При этом концентрация солей во флюидных включениях в минералах корундсодержащих пород несколько выше, чем во вмещающих породах.

Ключевые слова: корунд, метаморфизм, метасоматоз, флюидные включения, соленость.

Composition of fluid inclusions in minerals of corundum-bearing and host rocks of Khitoostrov occurrence (Fennoscandinavian Shield)

Akimova E.Yu. 

Institute of Earth sciences, Saint-Petersburg, e.akimova@spbu.ru

Abstract. Fluid inclusions in minerals of corundum-bearing and host rocks of the Khitoostrov occurrence (Fennoscandinavian shield) were studied: garnet, quartz, corundum, kyanite, plagioclase. The phase composition of fluid inclusions was determined using Raman spectrometry. Particular attention is paid to water-salt inclusions. The composition and concentration of salts in them were determined using microthermometry. Based on the obtained data on the composition of fluid inclusions, we can assume that carbon dioxide-water fluid containing Ca and Na chlorides was in equilibrium with the minerals of corundum-bearing metasomatites. The similarity of the salt composition of fluid inclusions in corundum-containing and host rocks indicates that these rocks were formed in a single process (the Svecofennian stage of regional metamorphism). At the same time, the concentration of salts in fluid inclusions in the minerals of corundum-bearing rocks is somewhat higher than in the host rocks.

Keywords: corundum, metamorphism, metasomatism, fluid inclusions, salinity.

Введение

В пределах Беломорского подвижного пояса (восточная часть Фенноскандинавского щита) известно около десятка мелких проявлений корундсодержащих пород, расположенных среди пород чупинской толщи или вблизи её контактов (Серебряков, 2004). Эти породы характеризуются в разной степени выраженной аномалией изотопного состава кислорода и водорода в минералах (Bindeman et al., 2014). Наиболее крупное из этих проявлений – Хитоостров, где тело корундсодержащих метасоматитов расположено среди кианит-гранат-биотитовых гнейсов чупинской толщи недалеко от контакта с телом амфиболизированных габброидов. Ранее нами было установлено, что корундсодержащие породы проявления Хитоостров – метасоматиты, развивающиеся по кианит-гранат-биотитовым гнейсам чупинской толщи путём десиляции последних при повышенной активности Na и пониженной активности K (Акимова, Кольцов, 2022). Для выяснения состава и свойств флюида, участвовавшего в метасоматическом процессе, представляет интерес исследование флюидных включений в минералах, зарекомендовавшее себя как информативный метод изучения среды минералообразования (Рёддер, 1987).

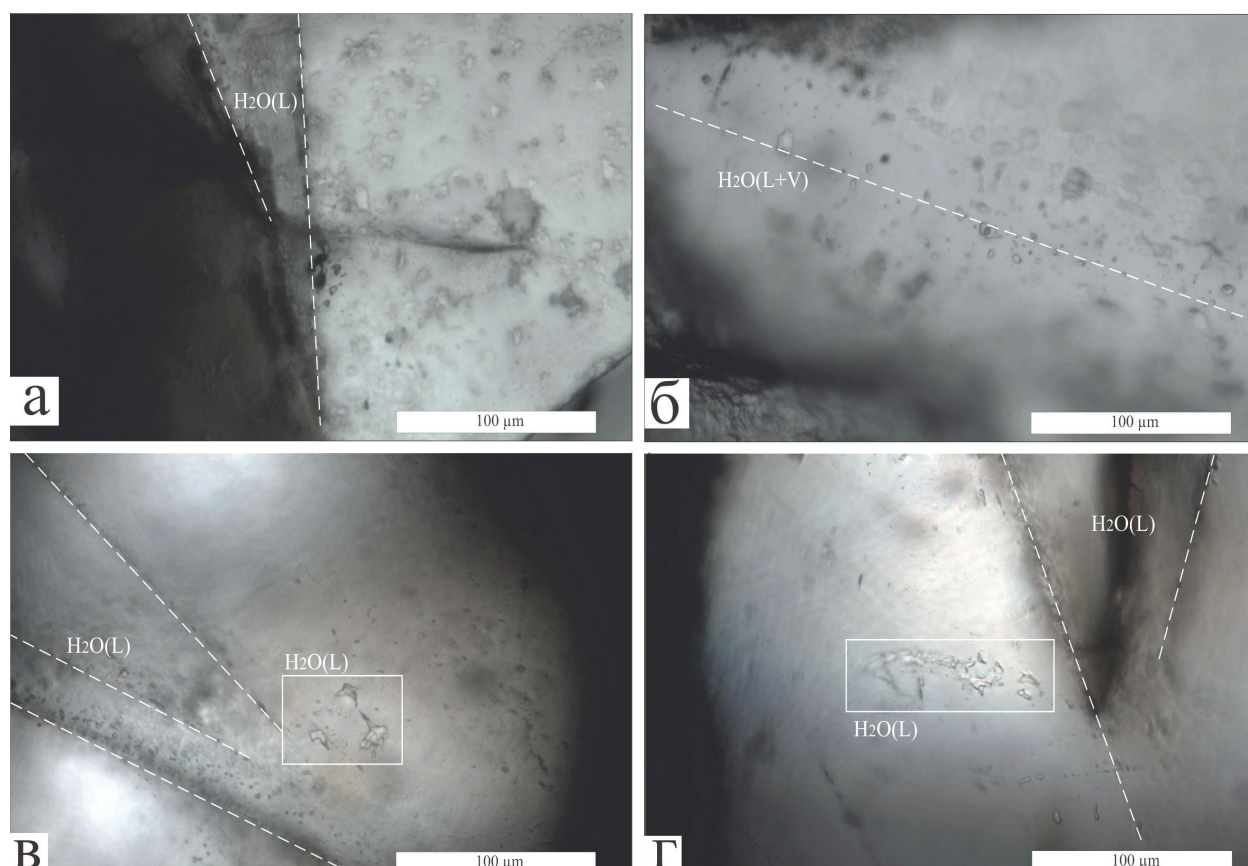


Рис. 1. Флюидные включения во вмещающих породах:

а – цепочки вторичных водно-солевых включений в кварце из кианит-гранат-биотитовых гнейсов чупинской толщи на контакте с корундсодержащими метасоматитами; б – цепочка первично-вторичных водно-солевых включений в кварце из кианит-гранат-биотитовых гнейсов чупинской толщи на контакте с корундсодержащими метасоматитами; в – группа первично-вторичных и цепочки вторичных водно-солевых включений в кварце из гранат-биотитовых гнейсов чупинской толщи на удалении от контакта с корундсодержащими метасоматитами; г – группа первично-вторичных и цепочки вторичных водно-солевых включений в кварце из кианит-гранат-биотитовых гнейсов чупинской толщи на удалении от контакта с корундсодержащими метасоматитами. L – жидкость, V – газ. Пунктирными линиями обозначены цепочки флюидных включений, прямоугольниками – группы флюидных включений.

Fig. 1. Fluid inclusions in host rocks:

a – chains of secondary water-salt inclusions in quartz from kyanite-garnet-biotite gneisses of the Chupinskaya sequence at contact with corundum-bearing metasomatites; б – chain of primary-secondary water-salt inclusions in quartz from cyanite-garnet-biotite gneisses of the Chupa sequence at the contact with corundum-bearing metasomatites; в – a group of primary-secondary and chains of secondary water-salt inclusions in quartz from kyanite-garnet-biotite gneisses of the Chupa sequence at a distance from contact with corundum-bearing metasomatites. L is liquid, V is gas. Dashed lines indicate chains of fluid inclusions, rectangles indicate groups of fluid inclusions.

Материалы и методы

Флюидные включения изучались в пластинках толщиной около 0.3 мм, полированных с двух сторон. Изучены 6 образцов корундсодержащих пород проявления Хитоостров; среди вмещающих пород изучены 3 образца гнейсов чупинской толщи и 2 образца гранатовых амфиболитов.

Микротермометрические исследования производились с использованием термокриометрической установки Linkam THMSG 600 и микроскопа Olympus BX51, работающей в диапазоне температур от -196 до $+600^{\circ}\text{C}$. Изменения температуры контролировались с помощью программного модуля Linksys 32. Криометрические исследования позволяют установить фазовый, в том числе солевой состав флюидных включений (температура эвтектики), а также определить концентрацию солей (температура таяния последнего кристаллика льда) (Рёддер, 1987). Для идентификации солевого

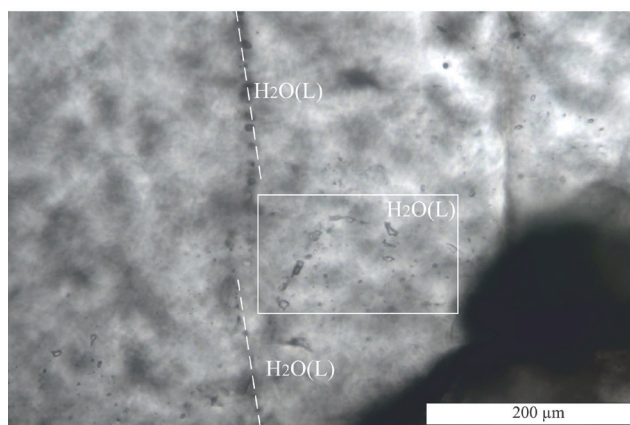


Рис. 2. Группа первично-вторичных и цепочки вторичных водно-солевых включений в кварце из гранатовых амфиболитов. Пунктирными линиями обозначены цепочки флюидных включений, прямоугольниками – группы флюидных включений.

Fig. 2. Group of primary-secondary and chains of secondary water-salt inclusions in quartz from garnet amphibolites. Dashed lines indicate chains of fluid inclusions, rectangles indicate groups of fluid inclusions.

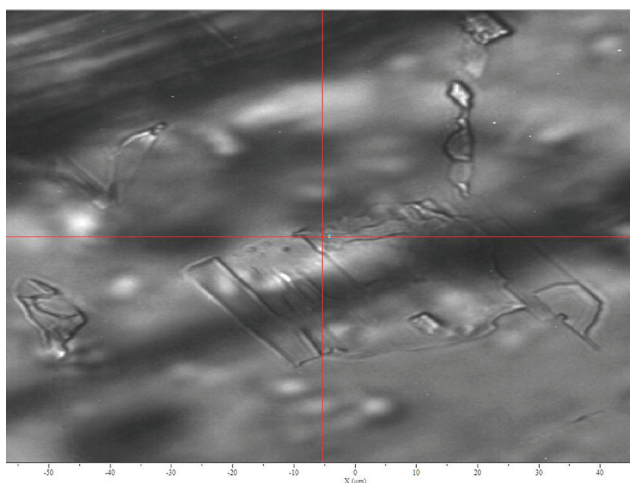


Рис. 3. Углекислотные включения в породах с парагенезисом Pl+Grt+Bt+Ky.

Fig. 3. Carbon dioxide inclusions in rocks with paragenesis Pl+Grt+Bt+Ky.

ними $T_{ml} = -23^\circ\text{C}$, $T_{mf} = -6^\circ\text{C}$ (что соответствует 7 % вес. % NaCl) (рис. 1 а, б). В мигматизированных кианит-гранат-биотитовых гнейсах на удалении от проявления корундсодержащих пород присутствуют цепочки первично-вторичных водно-солевых включений со средними $T_{ml} = -49^\circ\text{C}$, $T_{mf} = -13^\circ\text{C}$ (что соответствует 5 вес. % CaCl_2 и 1 вес. % NaCl), а также менее распространенные цепочки вторичных водно-солевых включений со средними $T_{ml} = -57^\circ\text{C}$, $T_{mf} = -19^\circ\text{C}$ (вероятно, система $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CaCl}_2-\text{LiCl}_2$) (рис. 1 г). В мигматизированных гранат-биотитовых гнейсах на удалении от проявления корундсодержащих пород присутствуют цепочки первично-вторичных водно-солевых включений со средними $T_{ml} = -51^\circ\text{C}$, $T_{mf} = -21^\circ\text{C}$ (что соответствует 20 вес. % CaCl_2 и 1 вес. % NaCl), а также цепочки вторичных водно-солевых включений со средними $T_{ml} = -49^\circ\text{C}$, $T_{mf} = -7^\circ\text{C}$ (что соответствует 10 вес. % CaCl_2 и 1 вес. % NaCl) (рис. 1 в).

состава водно-солевых флюидных включений использовалась таблица в (Борисенко, 1977). Для расчёта солёностей – программные средства (Steele-MacInnis et al., 2011, Bakker, 2018).

Рамановская спектроскопия использовалась для установления фазового состава содержимого флюидных включений в минералах корундсодержащих и ассоциирующих пород. Исследование проведено в ресурсном центре «Геомодель» на рамановском спектрометре Horiba Jobin-Yvon LabRam HR800 с микроскопом Olympus BX41, объектив 50х, использовался ионный аргоновый лазер, применялись notch-фильтры для работы на 488нм и 514 нм с мощностью до 50мВт (аналитик Бочаров В.Н.). Идентификация вещества флюидных включений производилась с использованием данных из работы Фреззотти (Frezzotti et al., 2012). Часть данных по флюидным включениям также получена при помощи рамановского спектрального анализатора с микроскопом РамМикс М532 в ИГГД РАН.

Результаты

Флюидные включения в минералах вмещающих пород

Во всех разновидностях этих пород есть кварц, поэтому именно в нём изучались флюидные включения. Как правило, это цепочки включений неправильной формы размерами 5–20 мкм.

В мигматизированных кианит-гранат-биотитовых гнейсах на контакте с проявлением корундсодержащих пород присутствуют цепочки первично-вторичных водно-солевых включений со средними $T_{ml} = -33^\circ\text{C}$, $T_{mf} = -21^\circ\text{C}$ (что соответствует 17 вес. % CaCl_2 и 5 вес. % NaCl), также встречены немногочисленные вторичные водно-солевые включения со сред-

В мигматизированных гранатовых амфиболитах встречены единичные первичные водно-солевые включения со средними $T_{ml} = -44^{\circ}\text{C}$, $T_{mf} = -25^{\circ}\text{C}$ (что соответствует 21 вес. % CaCl_2 и 2 вес. % NaCl), цепочки первично-вторичных включений со средними $T_{ml} = -40^{\circ}\text{C}$, $T_{mf} = -9^{\circ}\text{C}$ (что соответствует 12 вес. % CaCl_2 и 1 вес. % NaCl), а также единичные вторичные водно-солевые включения со средними $T_{ml} = -12^{\circ}\text{C}$, $T_{mf} = 0^{\circ}\text{C}$ (что соответствует ≤ 5 вес. % экв. NaCl) (рис. 2). Присутствуют также немногочисленные углекислотные включения.

Во всех разновидностях пород с водно-солевыми включениями в ассоциации иногда встречаются мелкие газовые (азотные) включения.

Флюидные включения в минералах корундосодержащих пород

В корундосодержащих породах (6 образцов) отсутствует кварц, поэтому включения изучались в других минералах. В корунде и кианите присутствуют только первично-вторичные углекислотные флюидные включения сложной полигональной или округлой формы размером от 5 до 20 мкм, реже до 60 мкм, расположенные, как правило, цепочками (рис. 3–5). В плагиоклазе и гранате, помимо углекислотных (рис. 6 б), распространены также водно-солевые включения.

В породах с парагенезисом $\text{Pl}+\text{Grt}+\text{Bt}+\text{St}$ в гранате распространены водно-солевые включения вытянутой, округлой или более сложной формы размером от 1 до 10 мкм. Они расположены небольшими группами вдали от трещин отдельности, поэтому мы предполагаем, что это первично-вторичные включения (рис. 6 а). Иногда в них диагностируются дочерние фазы, представленные карбонатом (кальцитом). Для них средние $T_{ml} = -46^{\circ}\text{C}$, $T_{mf} = -32^{\circ}\text{C}$ (что соответствует 24 вес. % CaCl_2 и 2 вес. % NaCl).

В безамфиболовых корундосодержащих метасоматитах с парагенезисом $\text{Pl}+\text{Grt}+\text{Bt}+\text{Crn}$ в гранате обнаружены лишь единичные первично-вторичные водно-солевые включения вытянутой, округлой или более сложной формы размером от 1 до 10 мкм. В них также иногда диагностируются дочерние фазы, представленные кальцитом. Для них средние $T_{ml} = -49^{\circ}\text{C}$, $T_{mf} = -33^{\circ}\text{C}$ (что соответствует 24 вес. % CaCl_2 и 2 вес. % NaCl). В этих породах также распространены водно-солевые включения в плагиоклазе – чаще всего мелкие (около 5 мкм), расположены вдоль трещин спайности, в зонах серицитизации, поэтому мы предполагаем, что это вторичные включения (рис. 6 в). Для них средние $T_{ml} = -27^{\circ}\text{C}$, $T_{mf} = -13^{\circ}\text{C}$ (что соответствует 11 вес. % CaCl_2 и 6 вес. % NaCl).

В амфиболосодержащих корундосодержащих метасоматитах с парагенезисом $\text{Pl}+\text{Grt}+\text{Cam}+\text{Crn}$ в гранате распространены водно-солевые включения вытянутой, полигональной формы размером от 1 до 20 мкм (рис. 7 а–г; 8). Они расположены цепочками или небольшими группами, но вдали от трещин отдельности, поэтому мы предполагаем, что это первично-вторичные включе-

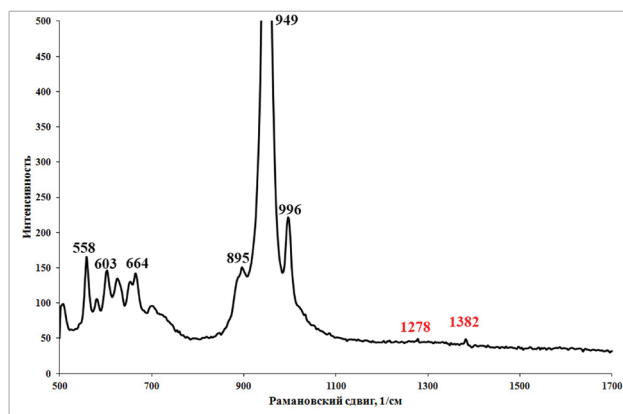


Рис. 4. Рамановский спектр кианита (пики подписаны черным цветом) и углекислотного включения в нём (пики подписаны красным цветом).

Fig. 4. Raman spectrum of kyanite (peaks in black) and carbon dioxide inclusions in it (peaks in red).

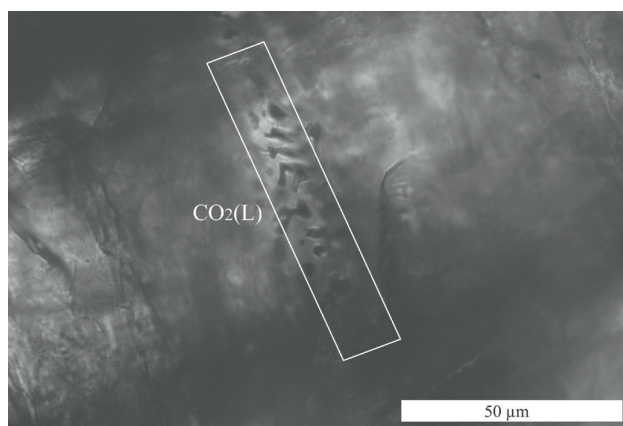


Рис. 5. Цепочка первично-вторичных углекислотных включений (обозначена белым прямоугольником) в корунде из амфиболосодержащих корундосодержащих метасоматитов с парагенезисом $\text{Pl}+\text{Grt}+\text{Cam}+\text{Crn}$.

Fig. 5. Chain of primary-secondary carbon dioxide inclusions (indicated by white rectangle) in corundum from amphibole-bearing corundum-bearing metasomatites with paragenesis $\text{Pl}+\text{Grt}+\text{Cam}+\text{Crn}$.

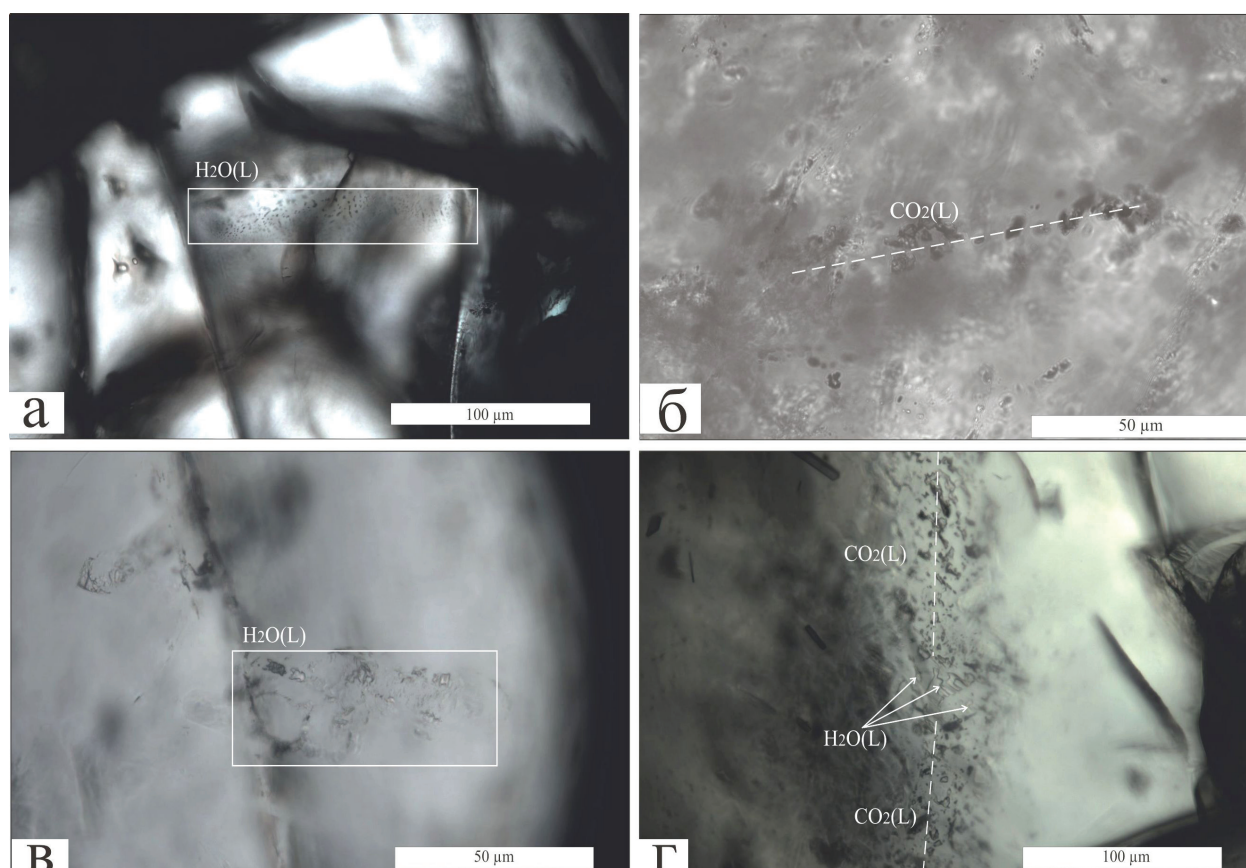


Рис. 6. Флюидные включения в минералах корундсодержащих метасоматитов: а – группа первично-вторичных водно-солевых включений в гранате из пород с парагенезисом Pl+Grt+Bt+St; б – цепочка первично-вторичных углекислотных включений в плагиоклазе из амфиболсодержащих корундсодержащих метасоматитов с парагенезисом Pl+Grt+Cam+Crn; в – цепочка вторичных водно-солевых включений в плагиоклазе из безамфиболовых корундсодержащих метасоматитов с парагенезисом Pl+Grt+Bt+Crn; г – цепочка первично-вторичных водно-солевых и углекислотных включений в гранате из плагиоклазитов. Пунктирными линиями обозначены цепочки флюидных включений, прямоугольниками – группы флюидных включений.

Fig. 6. Fluid inclusions in minerals of corundum-bearing metasomatites: a – group of primary-secondary water-salt inclusions in garnet from rocks with paragenesis Pl+Grt+Bt+St; b – chain of primary-secondary carbon dioxide inclusions in plagioclase from amphibole-bearing corundum-bearing metasomatites with paragenesis Pl+Grt+Cam+Crn; c – chain of secondary water-salt inclusions in plagioclase from amphibole-free corundum-bearing metasomatites with paragenesis Pl+Grt+Bt+Crn; d – chain of primary-secondary water-salt and carbon dioxide inclusions in garnet from plagioclasicites. Dashed lines indicate chains of fluid inclusions, rectangles indicate groups of fluid inclusions.

ния. Иногда в них диагностируются дочерние фазы, представленные кальцитом (рис. 9, 10). Для них средние $T_{ml} = -42^{\circ}\text{C}$, $T_{mf} = -32^{\circ}\text{C}$ (что соответствует 23 вес. % CaCl_2 и 3 % вес. % NaCl).

В гранат-биотитовых плагиоклазитах в гранате также распространены первично-вторичные водно-солевые включения вытянутой, полигональной или более сложной формы размером от 1 до 15 мкм (рис. 6 г). Иногда в них тоже диагностируются дочерние фазы, представленные кальцитом. Для них средние $T_{ml} = -45^{\circ}\text{C}$, $T_{mf} = -34^{\circ}\text{C}$ (что соответствует 25 вес. % CaCl_2 и 2 вес. % NaCl).

Выводы

Опираясь на результаты исследования флюидных включений в минералах корундсодержащих и вмещающих пород, мы можем сделать следующие выводы.

1. В минералах корундсодержащих и вмещающих пород обнаружены сходные по солевому составу водно-солевые включения, содержащие NaCl и CaCl_2 . По-видимому, такие включения характерны и для других пород Беломорского подвижного пояса – для решения этого вопроса нужны дополнительные исследования. Сходство солевого состава флюидных включений в корундсодер-

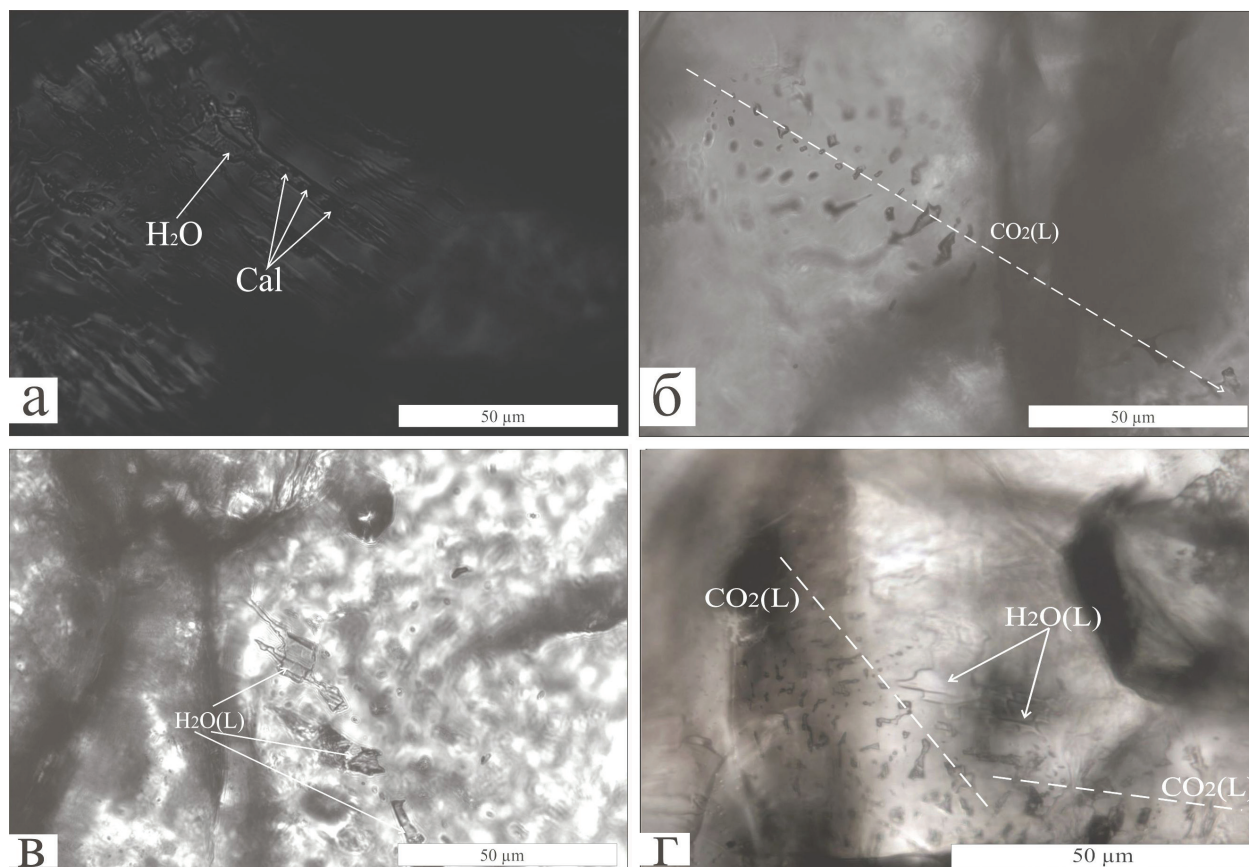


Рис. 7. Флюидные включения в гранате из амфиболсодержащих корундсодержащих метасоматитов с парагенезисом Pl+Grt+Cam+Crn: а – первично-вторичные водно-солевые включения с кристаллами кальцита; б – цепочка первично-вторичных углекислотных включений; в – группа первично-вторичных водно-солевых включений; г – группа первично-вторичных водно-солевых и углекислотных включений. Пунктирными линиями обозначены цепочки флюидных включений.

Fig. 7. Fluid inclusions in garnet from amphibole-bearing corundum-bearing metasomatites with paragenesis Pl+Grt+Cam+Crn: a – primary-secondary water-salt inclusions with calcite crystals; б – chain of primary-secondary carbon dioxide inclusions; в – group of primary-secondary water-salt inclusions; г – group of primary-secondary water-salt and carbon dioxide inclusions. Dashed lines indicate chains of fluid inclusions.

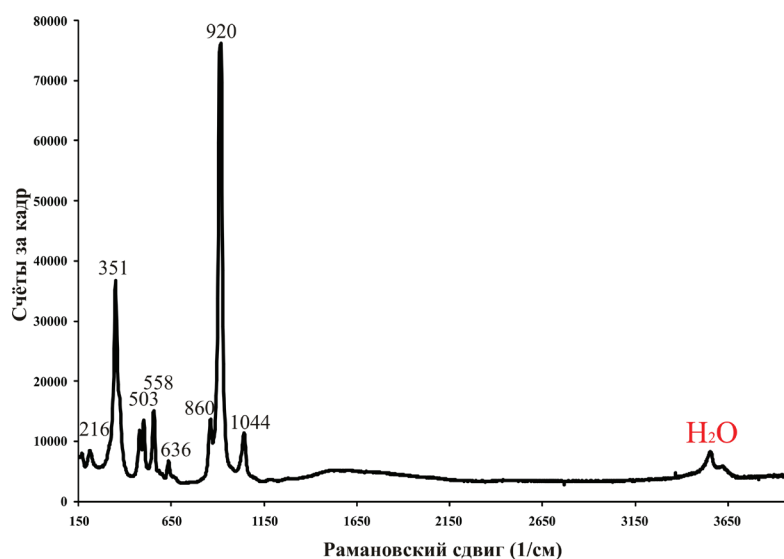


Рис. 8. Рамановский спектр граната (пики подписаны черным цветом) и водно-солевого включения в нем.

Fig. 8. Raman spectrum of garnet (peaks are inked in black) and a water-salt inclusion in it.

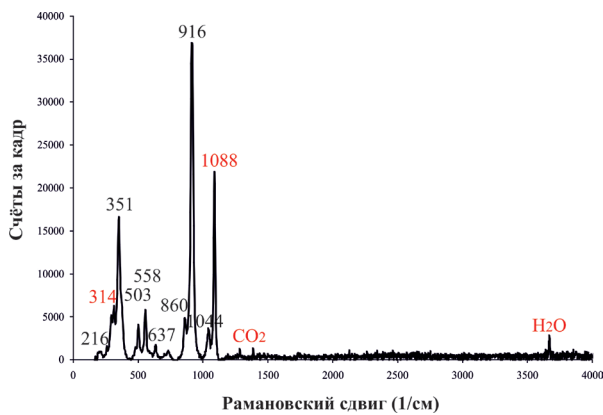


Рис. 9. Рамановский спектр граната (пики подписаны черным цветом) и водно-солевого включения с CO₂ и карбонатом в нем.

Fig. 9. Raman spectrum of garnet (peaks in black) and water-salt inclusion with CO₂ and carbonate in it.

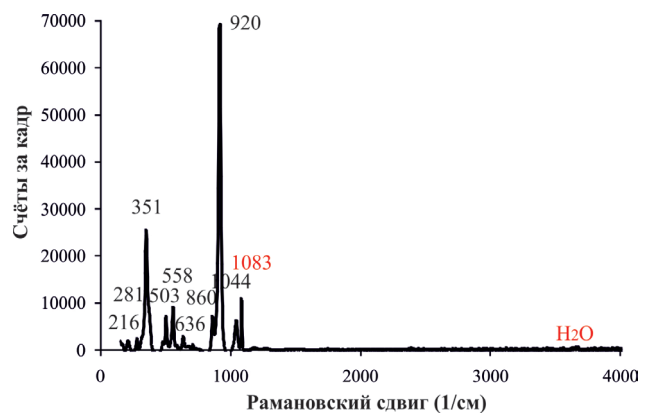


Рис. 10. Рамановский спектр граната (пики подписаны черным цветом) и водно-солевого включения с карбонатом в нем.

Fig. 10. Raman spectrum of a garnet (peaks are labeled in black) and a water-salt inclusion with carbonate in it.

жащих и вмещающих породах свидетельствует о том, что эти породы формировались в едином процессе (свекофеннский этап регионального метаморфизма).

2. При этом флюидные включения в минералах корундсодержащих пород характеризуются несколько более высокой общей солёностью. По всей видимости, в равновесии с минералами корундсодержащих метасоматитов находился флюид (раствор хлоридов Ca и Na), несколько отличный по составу от порового флюида вмещающих гнейсов чупинской толщи и гранатовых амфиболитов – характеризующийся более высокой концентрацией солей, в частности, CaCl₂.

Благодарности

Автор благодарен Вапнику Е.А. (Ben-Gurion University, Israel), Бочарову В.Н. (СПбГУ), Толмачевой Е.В. (ИГГД РАН) за помощь в освоении методик работы с флюидными включениями. Часть образцов для работы предоставлена Бушминым С.А. (ИГГД РАН).

Литература

1. Акимова Е.Ю., Кольцов А.Б. Термодинамическое моделирование процесса формирования корундсодержащих метасоматитов Беломорского подвижного пояса (Фенноскандинавский щит) // Петрология. 2022. Т. 30. № 1. С. 69–90. <https://doi.org/10.31857/S0869590322010022>.
2. Борисенко А.С. Изучение солевого состава растворов газовой-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. 1977. № 8. С. 16–27.
3. Реддер Э. Флюидные включения в минералах. М.: Мир, 1978. Т. 1. 360 с. Т. 2. 632 с.
4. Серебряков Н.С. Петрология корундсодержащих пород чупинской толщи Беломорского подвижного пояса (на примере Чупинского сегмента). Автореф. дисс. на соискание к.г.-м.н. М., 2004. 30 с.
5. Bakker R.J. AqSo_NaCl: Computer program to calculate p-T-V-x properties in the H₂O-NaCl fluid system applied to fluid inclusion research and pore fluid calculation. Computers & Geosciences. 2018. V. 115. P. 13–122. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.03.003>.
6. Bindeman I.N., Serebryakov N.S., Schmitt A.K. et al. Field and microanalytical isotopic investigation of ultradepleted in ¹⁸O Paleoproterozoic “Slushball Earth” rocks from Karelia, Russia. Geosphere. 2014. V. 10. P. 308–339. <https://doi.org/10.1130/GES00952.1>.
7. Frezzotti M.L., Tecce F., Casagli A. Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis. Journal of Geochemical Exploration. 2012. V. 112. P. 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.09.009>.
8. Steele-MacInnis M., Bodnar R.J., Naden J. Numerical model to determine the composition of H₂O-NaCl-CaCl₂ fluid inclusions based on microthermometric and microanalytical data. Geochimica et Cosmochimica Acta. 2011. V. 75. P. 21–40. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.10.002>.