

**Влияние постзахватного преобразования расплавных включений в кварце риолитов кальдеры Карымшина на состав захваченного расплава**

**Рогозин А.Н.<sup>1</sup>, Смирнов С.З.<sup>2</sup>**

**Influence of post-entrapment transformations of melt inclusions in quartz from the rhyolites of the Karymshina caldera on the composition of the trapped melt**

**Rogozin A.N., Smirnov S.Z.**

<sup>1</sup> *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;  
e-mail: alekseiras@yandex.ru*

<sup>2</sup> *Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск*

Сообщение посвящено исследованию расплавных включений во вкрапленниках кварца в риолитах экструзий района кальдеры Карымшина (Южная Камчатка). Установлено, что на состав расплавных включений оказали воздействие существенные постзахватные преобразования: постзахватная кристаллизация кварца на стенки включений и декрипитация.

**Введение**

Включения минералообразующих сред являются уникальными контейнерами, захватившими вещество, из которого рос минерал. Однако, после захвата расплав и флюид подвергаются различным постзахватным изменениям, которые иногда приводят к существенным отклонениям состава и свойств захваченного вещества от исходных составов. К таким изменениям относятся расшнурование включений, декрипитация и диффузионный обмен между захваченным веществом и минералом-хозяином [1, 3].

На примере исследования расплавных включений (РВ) во вкрапленниках кварца в риолитах экструзий района кальдеры Карымшина были выявлены важные особенности морфологии включений. Установлено, что РВ испытали существенные постзахватные преобразования.

**Расплавные и флюидные включения в кварце риолитов кальдеры Карымшина**

В результате проведенных ранее исследований [7] нами было установлено, что вкрапленники кварца (рис. 1а, б) в риолитах экструзий кальдеры Карымшина содержат обильные природно-закаленные расплавные (рис. 1в-ж) и очень редкие флюидные включения (ФВ). Все включения чаще всего хаотично расположены в кристалле или образуют небольшие группы, имеющие иногда кристаллографические очертания (азональные включения), реже они расположены по зонам роста кварца. Все наблюдаемые ФВ и РВ имеют форму бипирамидального отрицательного кристалла кварца. Мелкие включения (менее 20-50 мкм), как правило, имеют гладкие грани со скругленными ребрами. Более крупные имеют заметных рельеф поверхности вакуоли. Довольно часто грани РВ остаются ровными, в то время как ребра и вершины обладают грубым рельефом. Подавляющее большинство РВ при комнатной температуре содержат прозрачное, бесцветное стекло и крупный пузырек. Характерной особенностью практически всех изученных РВ является наличие вокруг них трещин декрипитации (рис. 1г-е).

Флюидные включения, обнаруженные в кварце пород экструзий кальдеры Карымшина, крайне редки. Подавляющее большинство таких включений при комнатной температуре имеют существенно газовый состав. Обнаруженные ФВ встречаются совместно с РВ, образуя единые ассоциации (рис. 1з).

**Постзахватные преобразования РВ в кварце экструзий**

Включения в кварце экструзий имеют важные характерные особенности морфологии, которые предполагают, что РВ испытали существенные постзахватные преобразования (такие как постзахватная кристаллизация кварца (рис. 2) на стенках включений и декрипитация).

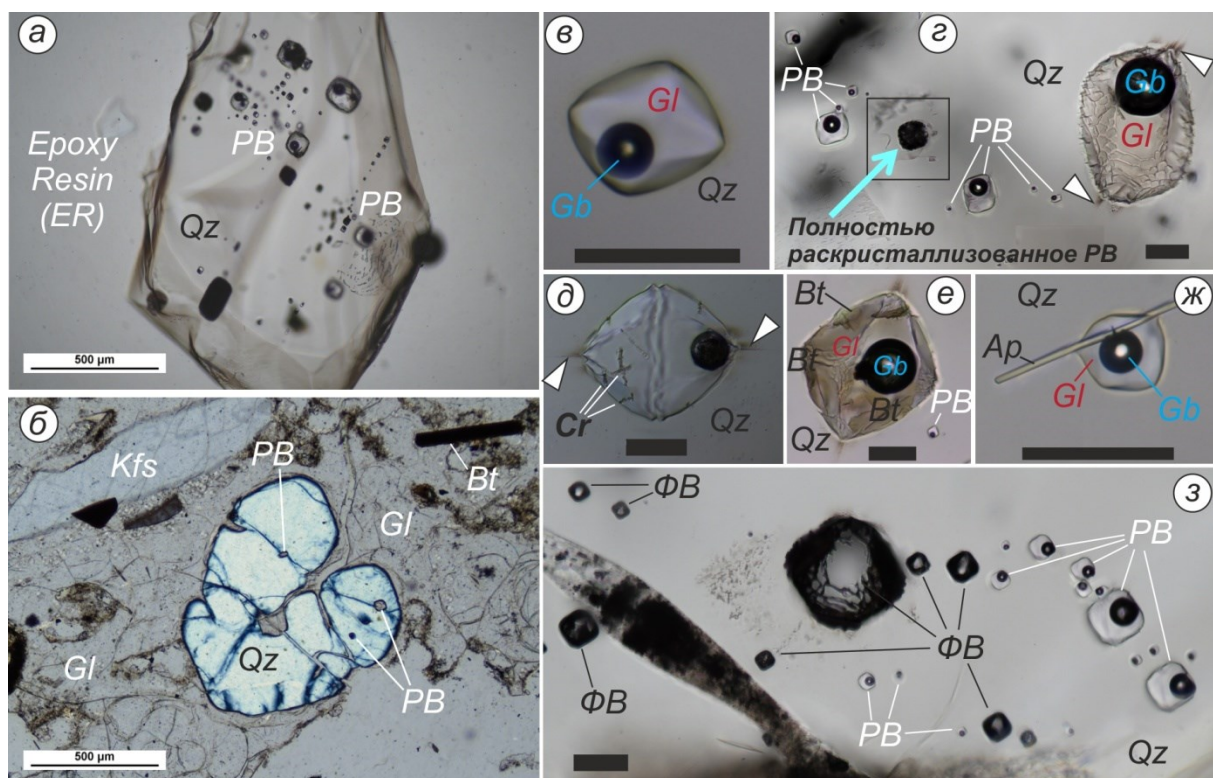


Рис. 1. Примеры вкрапленников кварца из риолитов экструзий кальдеры Карымшина, смонтированных в шашку из эпоксидной смолы (а) и в шлифе (б), содержащих природно-закаленные расплавные включения (в-ж). Ассоциация флюидных включений (ФВ) и расплавных включений (PB), встреченных в одном вкрапленнике кварца (з). Qz – кварц, GI – стекло витрофировой основной массы пород экструзий (б) и стекло PB (в-ж), Bt – биотит, Kfs – К-полевой шпат, Ap – апатит, Gb – газовый пузырек, Cr – кристаллические фазы, Epoxy Resin (ER) – эпоксидная смола. На photographs (в-з) масштабный маркер – 50 мкм.

**Постзахватная кристаллизация кварца (ПЗК).** Крупные включения имеют формы отрицательного кристалла с хорошо развитыми ребрами и гранями. Это предполагает, что значительное количество кремнезема из расплава было отложено на стенки вакуоли (рис. 2а, б). Развитие сети борозд вдоль ребер, на вершинах и, в конце концов, на гранях отрицательного кристалла может быть следствием неравномерного нарастания или протравливания поверхности вакуоли заключенным в нем расплавом (обратная резорбция). Были оценены величины ПЗК для включений, в которых, помимо этого, производилось измерение содержаний воды. Эта величина составила от 1.2 до 12.2 мас. % при медианном значении 4.2 мас. %.

**Постзахватный перегрев PB.** О том, что в процессе эволюции на магму в очаге было оказано тепловое воздействие, говорит оплавленная форма кварца и некоторых других минералов. Признаками постзахватного перегрева PB, на наш взгляд, могут являться борозды, образующие субпараллельный рисунок на месте ребер отрицательного кристалла и ячеистый на гранях и около вершин. Постзахватный перегрев включений может компенсировать влияние ПЗК. Полученные данные показывают, что для многих включений противоположное влияние этих факторов могло оказать существенное влияние на состав захваченного расплава.

Нами не установлено значимой корреляции между измеренным содержанием воды и величиной ПЗК, хотя общая тенденция к увеличению содержания воды с уменьшением величины ПЗК просматривается. Пересчет содержаний воды, измеренных в стеклах PB методом КР спектроскопии, с учетом ПЗК, показал, что в захваченных расплавах они варьируют в широких пределах от 2.1 до 5.5 мас. %. Причиной такого разброса могли быть как естественные флуктуации содержаний воды в магме, так и постзахватная декрипитация включений.

**Декрипитация РВ.** Как правило, декрипитация проявлена в виде роя небольших трещин, сгруппированных вблизи вершин отрицательного кристалла (рис. 2в).

Если декрипитация происходит, когда вещество включения находится в жидком и газообразном состоянии, часть летучих теряется, а в образовавшихся трещинах возникают вторичные флюидные включения [6]. В местах повышенной плотности дислокаций происходит диффузионная потеря воды в кристаллическую решетку кварца [2] вплоть до генерации новых флюидных включений на дислокациях [4].

Измерения объемной доли пузырька во включениях одной ассоциации показали более-менее стабильное соотношение пузыря и объема вакуоли включения. Объемная доля пузырька во включениях составляет от 5 до 30 %. Измерения в пределах одной ассоциации расплавных включений при среднем значении объемной доли пузырька ~25 % дали разброс от  $\pm 3-7\%$  до 15 %. Для более мелких включений с объемной долей пузырька ~5 % разброс может составлять  $\pm 1-2\%$ .

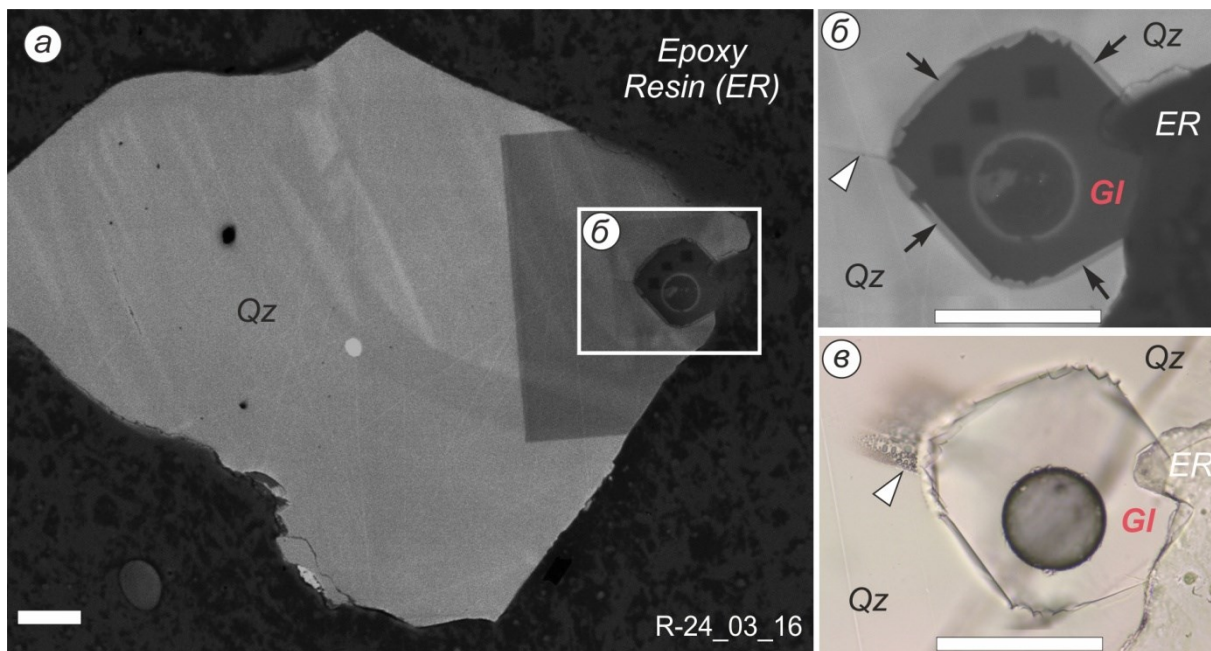


Рис. 2. Постзахватная кристаллизация кварца (ПЗК) на стенках расплавного включения. Католюминесцентное изображение вкрапленника кварца экструзии (а). Католюминесцентное изображение РВ, на стенках которого произошло отложение кварца в результате ПЗК (б). Изображение РВ в проходящем свете (в). Белой стрелкой показана трещина декрипитации РВ. Черными стрелками показан слой отложенного кварца на стенках включения. Квадратные контуры на (а-б) результат воздействия электронного пучка сканирующего микроскопа. Qz – кварц, GL – стекло РВ, Epoxy Resin (ER) – эпоксидная смола. На всех фотографиях масштабный маркер – 100 мкм.

### Составы РВ с учетом постзахватных изменений

Большие вариации содержания воды в стекле предполагают, что часть воды могла быть потеряна. Причиной этой потери могла стать постзахватная дегазация, при которой снижается содержание воды в расплаве, диффузионная потеря в решетку кварца и потеря газообразной воды в трещины декрипитации. Никаких закономерностей в вариациях оценок содержаний воды в РВ в связи с наличием или отсутствием трещин вокруг вакуолей включений мы не обнаружили. Более того, включения с максимальными измеренными содержаниями воды имеют трещины декрипитации. В одном из декрипитированных включений нам удалось обнаружить гетерогенный пузырек, содержащий кайму жидкой воды. Из этих наблюдений следует, что хоть влияние декрипитации на состав включений и не может быть исключено, но оно могло быть незначительным, по крайней мере, для некоторых из них. Таким образом, максимальные оценки содержаний воды с учетом ПЗК можно

считать близкими к ее концентрациям в магматических расплавах, участвовавших в событиях, которые привели к образованию кальдеры Карымшина.

Принимая во внимание водонасыщенность расплавов, мы можем оценить адекватность наших оценок, используя модели растворимости H<sub>2</sub>O в риолитовом расплаве, находящемся в равновесии с чисто водным флюидом. Предполагая, что эволюция расплава происходила при 750 °С и 1.8 кбар [5, 7], мы определили, что насыщенные водой расплавы магм, сформировавших риолитовые экструзии кальдеры Карымшина, будут в равновесии с кварцем и чисто водным флюидом при содержании в них 5.8 мас. % H<sub>2</sub>O, что хорошо согласуется с максимальными оценками содержания воды в стеклах РВ, захваченных кварцем экструзий.

### Заключение

Установлено, что на состав РВ в кварце риолитовых экструзий кальдеры Карымшина оказали воздействие существенные постзахватные преобразования: постзахватная кристаллизация кварца (ПЗК) на стенки включений и декрипитация. Наблюдаемые отклонения составов РВ от исходно захваченных объясняются отложением на стенки от 1 до 23 мас. % SiO<sub>2</sub>. Показано, что влияние постзахватного перегрева РВ может сместить составы расплавов в сторону исходно захваченных, минимизируя эффект ПЗК. Несмотря на такие сложные постзахватные изменения, стекла некоторых природно-закаленных РВ сохранили растворенную в захваченном расплаве воду, содержание которой в расплавах с учетом ПЗК составило 2.1-5.5 мас. %. Учитывая отсутствие корреляции между содержанием воды и проявлением признаков декрипитации, мы считаем, что влияние этого явления на составы РВ некоторых включений могло быть незначительным. Из этого следует, что максимальные оценки содержания H<sub>2</sub>O близки к водосодержанию захваченных в РВ расплавов, что подтверждается данными моделирования.

Работа выполнена в рамках госзаданий ИВиС ДВО РАН (тема FWME-2024-0012) и ИГМ СО РАН (тема FWZN-2026-0017).

### Список литературы

1. Плечов П.Ю. Методы изучения расплавных включений. Москва: Изд-во КДУ, 2014. 266 с.
2. Audétat A., Gunther D. Mobility and H<sub>2</sub>O loss from fluid inclusions in natural quartz crystals // Contribution to Mineralogy and Petrology. 1999. V. 137. P. 1-14.
3. Audétat A., Lowenstern J.B. Melt Inclusions // In: Holland H.D. and Turekian K.K. (eds.) Treatise on Geochemistry, Second Edition. 2014. V. 13. P. 143-173.
4. Bakker R.J., Jansen J.B.H. A mechanism for preferential H<sub>2</sub>O leakage from fluid inclusions in quartz, based on TEM observations // Contribution to Mineralogy and Petrology. 1994. V. 116. P. 7-20.
5. Bindeman I.N., Leonov V.L., Izbekov P.E. et al. Large-volume silicic volcanism in Kamchatka: Ar–Ar and U–Pb ages, isotopic, and geochemical characteristics of major pre-Holocene caldera-forming eruptions // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2010. V. 189. P. 57-80. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.10.009>
6. Lowenstern J.B. Application of silicate-melt inclusions to the study of magmatic volatiles // In: Thompson JFH (ed.) Magmas, Fluids and Ore Deposition, Mineralogical Association of Canada Short Course Series, Ottawa, ON: Mineralogical Association of Canada. 1995. V. 23. P. 71-98.
7. Rogozin A.N., Smirnov S.Z. H<sub>2</sub>O content in melt involved in the formation of the Karymshina caldera (South Kamchatka) // Journal of Volcanology and Seismology. 2025. V. 19. Suppl. 1. P. S75-S9. <https://doi.org/10.1134/S074204632570054X>