

Возможная причина резкого расхождения между оценками давления, полученными по сингенетичным расплавному и флюидным включениям в кварце гранитов

Рейф Ф.Г.

Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, Россия, felix@geo.buryatia.ru

Possible reason for sharp discrepancy between estimates of pressure derived from quartz-hosted syngenetic melt and fluid inclusions in granites

Reyf F.G.

Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude, Russia, felix@geo.buryatia.ru

Summary. Syngenetic inclusions of silicate melt (MI) and exsolved fluid (MFI) in a late-magmatic quartz are used to estimate P, T, C_{H_2O} -conditions during crystallization of the granite-porphry from a fluid-saturated magma (Gudjir intrusion, Transbaikalia). The homogenization temperature ($T_h=750^\circ\text{C}$) and water content ($C_{H_2O}=4.5\%$) typical for these MIs are close to the experimentally determined H_2O solubility in water-saturated haplogranite melt at $P\approx 1.3$ kbar. A salinity of the MFI solution (22–24 wt% equiv. NaCl) and their $T_h=300^\circ\text{C}$ correspond to an isochore that intersect H_2O -saturated solidus at $P>5$ kbar. The evidence is adduced that revealed sharp discrepancy in pressure estimates is caused by the change in H_2O content of MI and MFI during their reequilibration with a pore fluid through crystal lattice of quartz. With allowance made for this circumstance the discrepancy may be reduced to 0.7 kbar.

Для решения ряда проблем петрогенезиса и рудообразования важное значение имеет определение флюидного давления во время кристаллизации водонасыщенных природных магм. С этой целью исследована Гуджирская интрузия гранит-порфиров, с которой связаны Mo и W месторождения Джидинского рудного поля (Забайкалье). Интрузия образована тремя порциями магмы, последовательно внедрившимися из общего глубинного источника, и жильными аплитами – продуктами кристаллизационной дифференциации *in situ*. Расплавные включения (РВ) в кварце вкрапленников и мелкозернистого мезостазиса наряду с кристаллическим агрегатом содержат газовый пузырь и небольшое количество водного раствора, которые гомогенизируются в жидкую фазу при 230–270 °С. При нагреве выше этой температуры РВ размером >3 мкм декрепитируют, поэтому температура их полной гомогенизации (T_r^{PB}) определялась с точностью $\pm 15^\circ$ под сдерживающим давлением аргона до 5 кбар. Содержание H_2O в РВ (C_{H_2O}) рассчитывалось с относительной погрешностью $\pm 15\%$ (1σ) на основе термо- и волюмометрических данных (Наумов, 1979), но с учетом воды, содержащейся в дочернем мусковите, и объема кварца, перешедшего в расплав со стенок вакуоли к моменту гомогенизации РВ (Рейф, 1990; Reyf et al., 2000).

Вероятнее всего, РВ в фенокристах характеризуют ранние стадии кристаллизации магмы в доинтрузивный период, а РВ в кварце мезостазиса гранит-порфиров и жильных аплитов – поздние стадии кристаллизации на месте залегания. Первые систематически отличаются от вторых более высокой T_r^{PB} (790–760°С против 750–740°С) и более широкими вариациями C_{H_2O} (7.3–4.1 мас.% против 4.5 ± 0.5).

В кварце мезостазиса и в периферических зонах некоторых фенокристов наряду с РВ обнаружены сингенетичные первичные включения магматического флюида (ВМФ) с $T_r = 300\text{--}290^\circ\text{C}$, реже $255\text{--}230^\circ\text{C}$. При их замораживании CO_2 не фиксируется, а при последующем нагревании сначала плавится лед ($-11.2\text{--}-4.2^\circ\text{C}$), затем кристалл соли с показателем преломления, как у раствора (предположительно KHF_2), растворяющийся при $3.3\text{--}6.2^\circ\text{C}$, что соответствует его концентрации 22–20% или около 26% экв. NaCl.

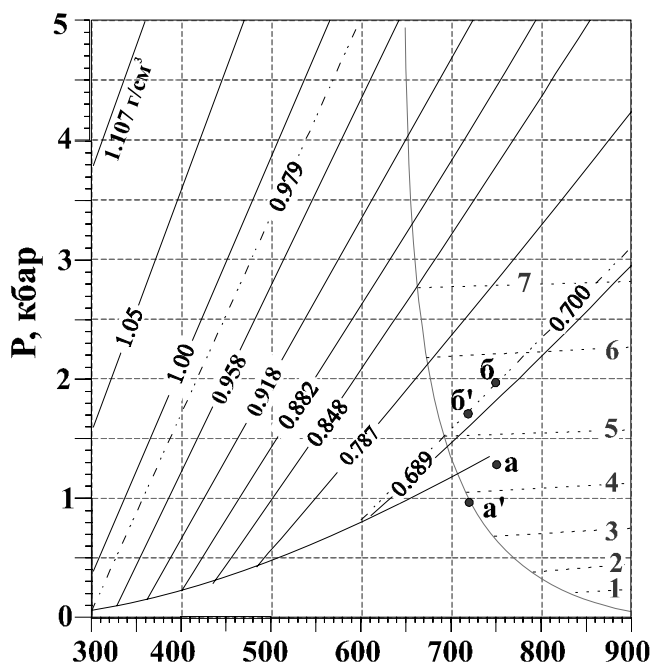


Рис. 1. P, V, T -диаграмма 26%-ного раствора NaCl, совмещенная с T, P, C_{H_2O} -диаграммой гаплогранитной системы. Сплошные и штрих-пунктирные линии – изохары ($г/см^3$); точечные линии – изоплеты растворимости H_2O (мас.%) в гаплогранитном расплаве; кривые линии: 2-фазная кривая раствора и водонасыщенный солидус гранита; точки а, а', б, б' – см. пояснения в тексте.

Fig. 1. P, V, T -diagram for the 26% NaCl solution combined with P, T, C_{H_2O} -diagram for the haplogranite system. Solid and dashed-dotted lines are isochares (g/cm^3), dotted lines are water solubility isopleths (wt.%); curve lines: gas-liquid boundary for the solution and H_2O -saturated solidus for the melt. Explanation for points a, a', б, б' see in text.

Резко отличную и гораздо менее правдоподобную оценку $P_{фл}$ получаем исходя из сингенетичности РВ и ВМФ, с учетом их T_T и солёности раствора. Точки пересечения соответствующей изохары ($0.98 г/см^3$) с изотермой $750 °C$ и с кривой водонасыщенного солидуса находятся за пределами диаграммы (рис. 1) и дают значения $P_{фл} ≈ 7.5$ кбар и $≈ 5$ кбар. Если принять концентрацию солей в растворе ВМФ равной 7.7% экв. NaCl, то получим близкие значения $P_{фл} ≈ 5.8$ и 4.5 кбар. Предположение о несингенетичности РВ и ВМФ в данном случае не согласуется с надежными петрографическими признаками одновременности их захвата (равномерно-объемное распределение в зернах кварца, лишенных залеченных микротрещин, приуроченность к периферическим зонам некоторых фенокристов). Это делает необходимым рассмотрение других возможных причин выявленного расхождения в оценках $P_{фл}$.

Расчет давления в пузырьке водного флюида, находящемся в гранитном расплаве при $900 °C$, 1 кбар, показал, что за счет поверхностного натяжения на границе этих сред избыточное давление в пузырьке диаметром 0.1 мкм составляет всего 33 бар и с увеличением диаметра пузыря оно резко снижается. Следовательно, этим фактором можно пренебречь.

Относительно узкий диапазон T_T^{PB} и оценок C_{H_2O} в РВ из кварца аплитовых жил и мезостазиса гранит-порфиров при наличии сингенетичных ВМФ говорит о постоянстве содержания H_2O во флюидонасыщенных расплавах во время их кристаллизации на месте залегания. Это предполагает незначительную изменчивость флюидного давления ($P_{фл}$), которое, вероятно, примерно соответствовало литостатической нагрузке ($P_{лит}$) на данном уровне.

Для интерпретации полученных данных воспользуемся диаграммой, на которой в $P-T$ координатах совмещены 2-фазная кривая с изохорами 26%-ного раствора NaCl, по Anderko & Pitzer, 1999, и линия водонасыщенного солидуса в системе Q–Ab–Or с изоплетами растворимости H_2O в расплаве, по Holtz et al., 1992, 1995 (рис. 1). Из диаграммы видно, что изотерма $750 °C$ пересекается с изоплетой 4.5% H_2O в точке (а), для которой находим $P_{фл} = 1.3$ кбар, что в случае равенства $P_{фл}$ и $P_{лит}$ соответствует глубине около 4.8 км. Эта оценка кажется реалистичной, т.к. согласуется с преобладанием порфировых фаций гранитов на современном уровне среза интрузии. Однако точка (а) находится на некотором удалении от водонасыщенного солидуса, что указывает на неполное соответствие результатов изучения РВ экспериментальным данным по гаплогранитной системе.

Более существенное значение имеет тот факт, что по мере охлаждения кварца, захватившего ВМФ при 750°C , он неизбежно испытывает термическую усадку и α - β переход, сопровождающийся уменьшением удельного объема. По справочным данным, интегральный объемный эффект в диапазоне 750 – 300°C равен -3.45% . Следовательно, плотность содержимого ВМФ, определенная по T_{Γ} (300°), завышена, и при оценке $P_{\text{фл}}$ в момент захвата следует использовать изохору, соответствующую плотности $0.979/1.0345 = 0.946 \text{ г/см}^3$. Введение этой поправки уменьшает приведенные выше оценки $P_{\text{фл}}$ (7.5 и 5 кбар) до 6.3 и 4.8 кбар, но в принципе это проблему не решает.

Картина кардинально меняется, когда принимаются в расчет экспериментальные данные о возможности диффузионного обмена водой между законсервированным в кварце ФВ и окружающим кристалл флюидом при условии, что между ними существует градиент $f_{\text{H}_2\text{O}}$ и температура превышает "блокирующее" значение ($T_{\text{блок}}$), ниже которого эффективность такого обмена резко снижается. Точное значение $T_{\text{блок}}$ пока не установлено, но, по предположению Hall & Sterner, 1993, оно превышает 600°C . В экспериментах этих авторов длительностью от 12 часов до 3.5 суток включения раствора NaCl в кварце, синтезированные при известных P, T, X -параметрах, выдерживались в водной среде при 825°C , 1.5 кбар, что обеспечило превышение давления H_2O во включениях (P_{int}) над внешним (P_{ext}). Диффузия воды через кварц в направлении градиента $P_{\text{H}_2\text{O}}$ проявилась весьма отчетливо, причем потеря H_2O включениями тем выше, чем меньше их размер и чем больше продолжительность опытов. За 108 часов начальное содержание H_2O в ФВ размером 10 мкм уменьшилось на 15 – 25% , а в более мелких (4 мкм) – на 50 – 60% . Ясно, что в условиях $P_{\text{int}} < P_{\text{ext}}$ диффузия воды должна иметь противоположное направление, т.е. содержание H_2O в ФВ будет увеличиваться.

Чтобы проверить, могло ли это явление обусловить получение аномально высоких значений $P_{\text{фл}}$, принято допущение, что за счет диффузионного притока воды в ВМФ при их более длительном, чем в эксперименте, переуравновешивании в диапазоне 750 – 600°C содержание H_2O в них увеличилось на 40% . В таком случае плотность флюида в момент захвата была ниже значения, установленного по T_{Γ} ВМФ (0.979 г/см^3) и составляла $0.979/1.4 = 0.699 \text{ г/см}^3$. Как видно на рис. 1, точка (б) пересечения соответствующей изохоры с изотермой 750° дает значение $P_{\text{фл}} = 2$ кбар, что значительно ближе к оценке, полученной по T_{Γ} и $C_{\text{H}_2\text{O}}$ расплавных включений (1.3 кбар). Правда точка (б), как и точка (а), оказалась на некотором удалении от кривой водонасыщенного солидуса, но это несоответствие можно уменьшить, если учесть, что переуравновешивание испытывают не только ВМФ, но и РВ.

Поскольку в момент консервации флюидонасыщенного расплава в нем растворено предельное при данных T и P количество воды, диффузионный приток H_2O в РВ делает невозможным ее полное растворение при температуре захвата ($T_{\text{захв}}$). Для этого требуется увеличение массы расплава за счет дополнительного подплавления стенок вакуоли, что достигается перегревом РВ относительно $T_{\text{захв}}$. Точно определить величину такого перегрева невозможно, но если допустить, что он составляет 30° и пересчитать $C_{\text{H}_2\text{O}}$ в РВ с поправкой на приток в него воды (в той же пропорции, что и в ВМФ) и уменьшить на 10% измеренный объем кварца, перешедшего в расплав, то получим новое значение $C_{\text{H}_2\text{O}} = 3,9\% \pm 0,3$, а точки (а) и (б) на диаграмме займут новое положение (а' и б'), приблизившись к линии солидуса. Соответствующие этим точкам значения $P_{\text{фл}}$ (1 и 1.7 кбар) все же различаются, но разница гораздо меньше, чем в случае оценки давления по нескорректированным термометрическим данным (1.3 и 7.5 кбар).

Как видим, предположение, что изученные РВ и ВМФ испытали переуравновешивание с привнесом в них правдоподобного (с точки зрения экспериментов Hall & Sterner) количества H_2O , приводит к удовлетворительному согласованию результатов изучения природных включений с диаграммой состояния водно-гранитной

системы и минимизирует расхождение в оценках $P_{\text{фл}}$ по РВ и ВМФ. Но, происходил ли

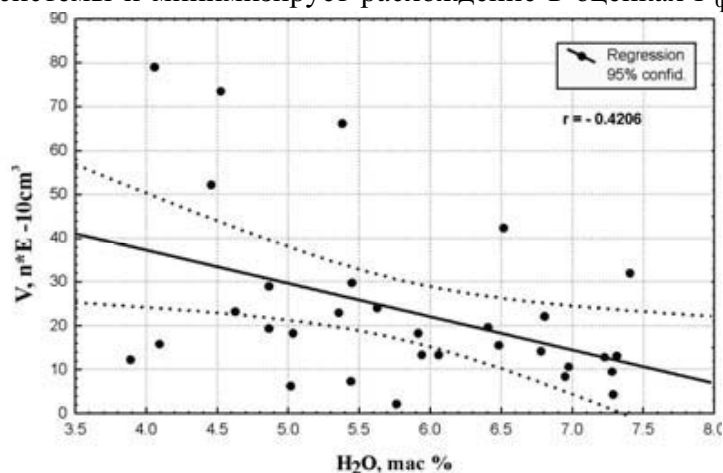


Рис. 2. Содержание H_2O (мас.%) в расплавных включениях из фенокристов кварца в зависимости от их объема ($n \cdot E - 10 \text{ см}^3$).

Fig. 2. Water content of melt inclusions (wt.%) versus their volume ($n \cdot E - 10 \text{ см}^3$).

H_2O (мас.%). Одной из причин большого разброса фигуративных точек на рис. 2 может быть образование фенокристов кварца в доинтрузивный период и во время внедрения магмы, в связи с чем водосодержание РВ в них может изначально различаться. Тем не менее коэффициент корреляции $r = 0.42$ статистически значим с 95%-ной доверительной вероятностью, так что преобразованность изученных РВ и ВМФ исключить нельзя.

В связи с этим возникает вопрос, в какой геологической обстановке могут возникнуть условия $P_{\text{int}} < P_{\text{ext}}$. По всей видимости, она характерна для кристаллической коры интрузии, в поровое пространство которой поступает флюид, выделяющийся из застывающей глубже высоководной магмы под давлением, равным литостатическому или превышающим его. За счет этого в межзерновом пространстве остывающей коры $P_{\text{фл}}$ может длительно поддерживаться на постоянном уровне и при субсолидусных температурах, тогда как во включениях оно с понижением T неизбежно уменьшается вдоль соответствующей изохоры.

Таким образом, к аномально высоким значениям $P_{\text{фл}}$, нередко получаемым при изучении ВМФ, следует относиться критически и принимать специальные меры для доказательства наличия/отсутствия признаков диффузионного перераспределения H_2O между включениями и поровым флюидом при $T > 600^\circ\text{C}$. Возможно, это явление распространено шире, чем считается в настоящее время.

Литература:

- Наумов В.Б. Определение концентрации и давления летучих компонентов в магматических расплавах // *Геохимия*. 1979. № 7. С. 997–1007.
- Рейф Ф.Г. Рудообразующий потенциал гранитов и условия его реализации. М. Наука, 1990, 181 с.
- Anderko A., Pitzer K. Equation-of-state representation of phase equilibria and volumetric properties of the system $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ above 573 K // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 1993. V. 57. P. 1657–1680.
- Hall D.L., Sterner S.M. Preferential water loss from synthetic fluid inclusions // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1993. V. 114. P. 489–500.
- Holtz F., Behrens H., Dingwell D.B., Taylor R.P. Water solubility in aluminosilicate melts of haplogranite composition at 2 kbar // *Chem. Geol.* 1992. V. 96. P. 289–302.
- Holtz F., Behrens H., Dingwell D.B., Johannes W. Water solubility in haplogranitic melts. Compositional, pressure and temperature dependence // *Am. Mineral.* 1995. V. 80. P. 94–108.
- Reyf F.G., Seltmann R., Zaraisky G.P. The role of magmatic processes in the formation of banded Li_2F -enriched granites from the Orlovka tantalum deposit, Transbaikalia, Russia: Microthermometric evidence // *Canad. Mineral.* 2000. V. 38. No. 4. P. 915–936.