

## О МЕТОДИКЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ПЕТРОГРАФИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОВО-ЖИДКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ КРИСТАЛЛА КВАРЦА

© 2012 г. Ю. И. Клюкин

Во время роста кристаллы могут захватывать флюид, в котором растут, формируя таким образом газОВО-жидкие включения (ГЖВ). Захваченный флюид может быть представлен жидкой, газовой или суперкритической фазой. Изучение ГЖВ позволяет реконструировать физико-химические параметры флюида в момент захвата. Цель настоящей работы – продемонстрировать подход к петрографическому изучению ГЖВ, позволяющий исследовать динамику эволюции флюида.

ГЖВ имеют много различных классификаций, основой которых служат морфологические, структурные, композиционные и генетические признаки. Так, Н.П. Ермаков приводит несколько классификаций [2], предлагая к использованию ту, в которой включения разделены по составу и происхождению. В настоящее время устоявшейся является классификация, подробно описанная Реддером [4]. Согласно последней, включения разделены на 3 категории в зависимости от времени их захвата: первичные, то есть захваченные при росте минерала-хозяина; вторичные – включения, которые образовались в течение какого-либо процесса, произошедшего после окончания кристаллизации минерала-хозяина; и псевдвторичные – эти включения захвачены, если минерал-хозяин в про-

цессе кристаллизации растрескивался и захватывал флюид (рис. 1).

Для идентификации характера захвата включений применяются критерии, указанные в работе [4]. Но для гидротермальных жил, типичной чертой которых является многократное прохождение флюида, доказательства первичности или вторичности включений могут быть ложными. Мало того, в работе [12] показано, что большинство включений, которые, согласно критериям [4], отнесены к первичным, фактически являются вторичными. При условии, что рассматривается не кристалл свободного роста, а агрегат зерен, использование критериев для определения характера захвата ГЖВ крайне осложнено. По этой причине в ряде случаев, при изучении образцов из гидротермальных жил, предложено исследование взаимного отношения ГЖВ в препарате [13].

Перед проведением исследований индивидуальных ГЖВ следует провести детальное петрографическое изучение подготовленного препарата. Единичей изучения является или ГЖВ, или скопление ГЖВ. В пределах одного скопления ГЖВ локализируются или в одной зоне роста кристалла, или в одной залеченной трещине в один момент эволюции минерала-хозяина. Идентичность состава ГЖВ

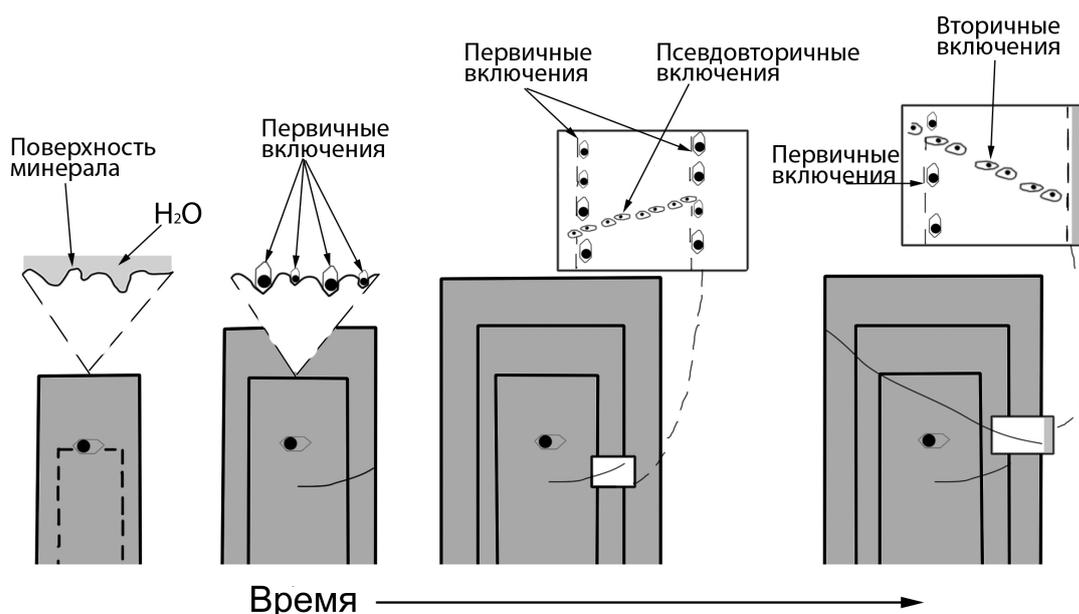


Рис. 1. Схема, представляющая формирование первичных, вторичных и псевдвторичных включений, по данным [6].

**Таблица 1.** Результаты термокриометрии и определения состава включений методом LA-ICPMS

	Е1	Е2	Д1	Д2	А	Б	В	Г
Характер захвата ГЖВ	скопления псевдоторичных ГЖВ				скопления первичных ГЖВ			
Период захвата	1		2		3	4	5	6
Доля CO <sub>2</sub> , об. %	80	50	70	80	80	70	60	70
T <sub>mCO<sub>2</sub></sub> , °C	-57	-56.9	-57.9	-58	-57.2	-57.4	-57	-57.5
T <sub>clath</sub> , °C	3.2	1.3	5	8.6	3.5	8.1	8.1	7.1
Th <sub>CO<sub>2</sub></sub> , °C	19.9	26.9	27	15.3	27.3	29.6	20.1	23.4
NaCl экв., масс %	11.6	14.1	9	2.8	11.2	3.7	3.7	5.5
Плотность включения, г/см <sup>3</sup>	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.7	0.9	0.8
Na, г/т	40024.9	49887.7	6065.1	10371.8	42830.8	15291.9	17458.8	21033
Mg		–	2190.4	–	–	–	–	–
K	589.7	6980.7	19228.4	2834.5	–	–	–	–
Ca	299	291.3	8245.8	30.1	–	763.8	6.7	–
Fe	111.6	–	453	0.3	–	419.2	–	–
Cu	–	–	444.7	–	457.5	422	26.4	224.7
Zn	4395	74.9	1485.8	11.4	–	380.2	–	–
As	677.7	258.9	–	36.3	610.4	370.1	208.9	299.8
Se	–	–	–	6.6	–	–	–	–
Sb	–	–	–	–	–	–	7.7	–
Ba	–	12	36.7	3.5	11.1	59.6	0.7	5.4
Pb	16.1	69.2	75.4	10.8	–	100.8	0.4	–
Bi	50.8	–	110.7	–	–	–	–	–

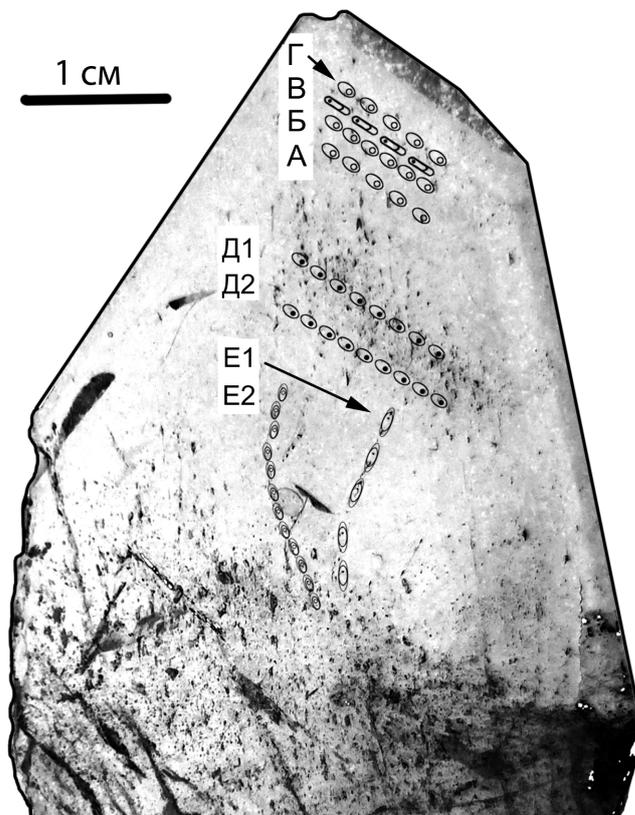
Примечание. T<sub>mCO<sub>2</sub></sub> – температура плавления CO<sub>2</sub>; T<sub>clath</sub> – температура плавления газгидрата CO<sub>2</sub>; Th<sub>CO<sub>2</sub></sub> – температура частичной гомогенизации. Ag и Te не были обнаружены ни в одном скоплении ГЖВ.

в скоплении приводит к тому, что температуры фазовых переходов близки. То есть измерение температур фазовых переходов в нескольких ГЖВ в скоплении позволяет узнать степень изменения содержания включений поздними процессами.

Петрографическое изучение препарата перед проведением исследования ГЖВ включает в себя выделение скоплений ГЖВ и выяснение их относительного времени образования. Детальное описание петрографического исследования приведено в [8–10]. После петрографического исследования состав ГЖВ определяется различными методами неструктивного и деструктивного анализа вещества.

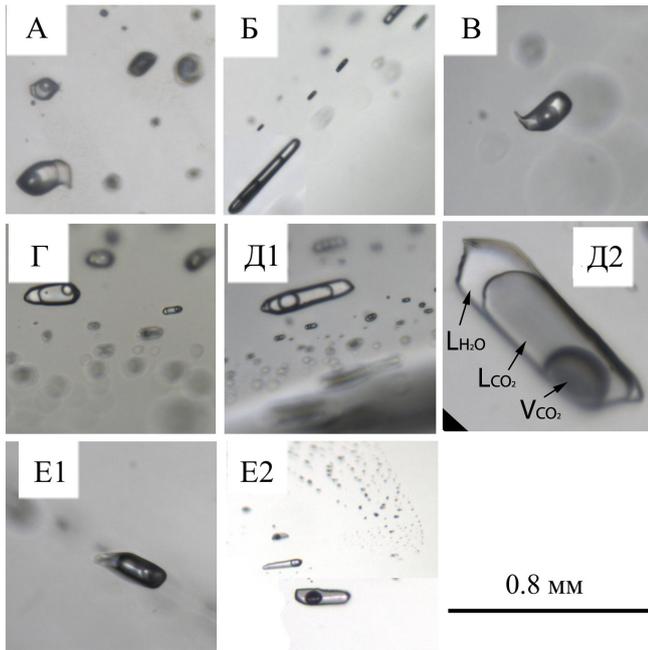
В качестве примера, иллюстрирующего возможности метода, рассмотрен один образец – кристалл кварца из карьера Изоплит, Шарташского гранитного массива, любезно предоставленный С.В. Прибавкиным.

Индивидуальные ГЖВ были изучены на термокриостоліке Linkam THMSG-600 в ИГГ УрО РАН. Солевой состав раствора определялся по температуре эвтектики [1]. Так как все включения принадлежат к системе H<sub>2</sub>O–CO<sub>2</sub>–NaCl, то концентрация соли в них оценивалась по температуре плавления газгидрата для системы [7]. Состав газовой и жидкой фаз был дополнительно оценен методом КР-спектроскопии на установке Jobin Yvon Labram Raman с конфокальной оптикой и 514 нм аргонным лазером мощностью 100 мВт. Наличие CO<sub>2</sub> определялось по поведению газового пузырька вблизи



**Рис. 2.** Схема кристалла, демонстрирующая расположение изученных скоплений ГЖВ.

А–Г – первичные включения, Д1, Д2, Е1,Е2 – псевдоторичные.



**Рис. 3.** Фотографии исследованных газовой-жидких включений кристалла при комнатной температуре.

Буквами L и V для включения Д2 обозначены жидкие и газовые фазы соответственно.

температуры тройной точки  $\text{CO}_2$ , а также подтверждено КР-спектроскопией. Плотность углекислоты рассчитывалась по уравнению линии равновесия жидкость-пар [5]. Микроэлементный состав жидкой фазы ГЖВ определялся методом LA-ICP-MS (квадрупольный масс-спектрометр Agilent 7500ce с системой лазерной абляции Excimer Lambda Physik GeoLas 193 nm) в лаборатории исследования флюида Политехнического университета и института Штата Вирджиния, США. Для расчета абсолютных содержаний элементов использована программа AMS 1.1.0, описанная в [11]. Определялись только содержания элементов, перечисленных в табл. 1.

ГЖВ в кристалле по размерам изменяются в широких пределах – от 10 мкм до 1.5 мм. При этом вблизи корня накладывается множество скоплений вторичных ГЖВ таким образом, что найти первичные не представлялось возможным. При проведении петрографического исследования определено, что все включения являются двух- и трехфазными,  $\text{Ж}_{\text{H}_2\text{O}} + \text{Ж}_{\text{CO}_2} \pm \text{Г}_{\text{CO}_2}$ , с долей  $\text{H}_2\text{O}$  во включении от 10 до 60 об. %. С учетом того фактора, что все включения содержат большую долю  $\text{CO}_2$  и нередко имеют большие размеры, температура гомогенизации ГЖВ не измерялась, чтобы избежать разрушения включений (декрепитации) всех ГЖВ в одном образце. Как указано в работе [3], температура декрепитации зависит от множества факторов и не имеет применения для генетической интерпретации. В то же время включения, содержащие высокоплотную

фазу  $\text{CO}_2$ , в большинстве случаев декрепитируют, не достигнув гомогенизации.

В основании кристалла (рис. 2) содержится большое количество вторичных включений, изучение которых осложнено из-за толщины препарата, подобранной с целью сохранения крупных включений. Поэтому изучены были включения, характеризующие заключительный момент роста кристалла и преобразования, связанные с захватом вторичных включений. Скопления ГЖВ, обозначенные на рис. 3 от А до Г, отнесены к первичным на основании того, что расположены в зонах роста кристалла и в редких случаях имеют захваченные при росте кристалла иглы рутила. Скопления ГЖВ, отнесенные к псевдотривторичным (Д1, Д2, Е1, Е2), располагаются вне зон роста по залеченным трещинам, и при этом не выходят за пределы граней роста в кристалле.

В табл. 1 представлены результаты изучения скоплений ГЖВ. Температура плавления  $\text{CO}_2$ , не соответствующая температуре плавления чистого  $\text{CO}_2$  –  $56.6^\circ\text{C}$ , свидетельствует о наличии примеси газов с низкой температурой плавления, возможно,  $\text{CH}_4$  или  $\text{N}_2$ . Флюид демонстрирует широкую вариативность состава, с основными компонентами  $\text{H}_2\text{O} - \text{CO}_2 - \text{NaCl} \pm \text{KCl}$ . Методика позволяет отследить эволюцию физико-химических параметров флюида в различные периоды формирования образца.

Автор выражает благодарность В.В. Мурзину за поддержку работы и Р.Дж. Боднару за методические пояснения.

*Исследование осуществлялось при финансовой поддержке УрО РАН (грант № 10-5-НП-400) и гранта РФФИ № 12-05-00132а.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Борисенко А.С.* Изучение солевого состава газовой-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. 1977. № 8. С. 16–27.
2. *Ермаков Н.П.* Геохимические системы включений в минералах. М.: Недра, 1972. 175 с.
3. *Ляхов Ю.В. Павлунь Н.Н., Пизнюр А.В. и др.* Термобарогеохимия золота (прогнозирование, поиски и оценка оруденения) / под ред. Е.М. Лазанько. Львов: Свит, 1995. 279 с.
4. *Рёддер Э.* Флюидные включения в минералах. М.: Мир, 1987. 559 с.
5. *Angus S., Armstrong B., deReuk K.M. et al.* International thermodynamic tables of the fluid state: Carbon dioxide. Pergamon, 1976. P. 385.
6. *Bodnar R.J.* Introduction to fluid inclusions // Fluid inclusions: Analysis and interpretation. Mineralogical Association of Canada., Short course series / eds. I. Samson, A. Anderson, D.D. Marshall., 2003. P. 1–8.
7. *Diamond L.W.* Stability of  $\text{CO}_2$  clathrate hydrate +  $\text{CO}_2$  liquid +  $\text{CO}_2$  vapour + aqueous KCl–NaCl solutions: Experimental determination and application to salinity estimates of fluid inclusions // Geochimica et

- Cosmochimica Acta. 1992. V. 56, № 1. P. 273–280.
8. *Goldstein R.H., Reynolds T.J.* Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals, Sepm short course 31. SEPM, 1994. P. 199.
  9. *Goldstein R.H.* Petrographic analysis of fluid inclusions // Fluid inclusions: Analysis and interpretation. Mineralogical Association of Canada., Short course series / eds. I. Samson, A. Anderson, D.D. Marshall., 2003. P. 9–53.
  10. *Kerkhof A.M. Van den, Hein U.F.* Fluid inclusion petrography // Lithos. 2001. T. 55. № 1-4. P. 27–47.
  11. *Mutchler S.R., Fedele L., Bodnar R.J.* Appendix A5: analysis management system (AMS) for reduction of laser ablation ICP-MS data // Laser ablation ICP-MS in the earth sciences: current practices and outstanding issues Short course series / ed. P. Sylvester., 2008. P. 318–327.
  12. *Roedder E., Bodnar R.J.* Fluid inclusion studies of hydrothermal ore deposits // Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. 1997. P. 657–697.
  13. *Wilkinson J.J.* Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits // Lithos. 2001. V. 55, № 1-4. P. 229–272.