

**Методика петрографического изучения газово-жидких включений
на основании выделения их скоплений**
(научный руководитель В. В. Мурзин)

Газово-жидкие включения (ГЖВ) имеют много различных классификаций, основанием которых служат морфологические, структурные, композиционные и генетические признаки. Так, Н. П. Ермаков [1972] предлагает к использованию классификацию, в которой включения разделены по составу и происхождению. В настоящее время устоявшейся является классификация, подробно описанная Э. Реддером [1987], согласно которой включения разделены на 3 категории в зависимости от времени захвата: первичные, т.е. захваченные при росте минерала-хозяина; вторичные – включения, которые образовались в течение какого-либо процесса, произошедшего после окончания кристаллизации минерала-хозяина; и псевдовторичные, захваченные в том случае, если минерал-хозяин в процессе кристаллизации растрескивался и захватывал флюид.

Для идентификации характера захвата включений применяются критерии, указанные в [Реддер, 1987], и определение характера захвата ГЖВ несомненно является важным. Но для гидротермальных жил, типичной чертой которых является многократное прохождение флюида, доказательства первичности или вторичности включений могут быть ложным. Кроме того, в работе [Roedder, Bodnar, 1997] показано, что большинство включений, которые согласно критериям [Реддер, 1987] отнесены к первичным, фактически являются вторичными. При рассмотрении агрегата зерен, а не кристалла свободного роста, использование критериев для определения характера захвата ГЖВ крайне осложнено. По этой причине в ряде случаев, при изучении образцов из гидротермальных жил предложено взаимное отношение ГЖВ в препарате [Wilkinson, 2001].

Перед проведением исследований индивидуальных ГЖВ следует провести детальное петрографическое изучение подготовленного препарата. При таком исследовании единицей изучения является ГЖВ или скопление ГЖВ, под которым подразумевается группа одновременно захваченных включений. ГЖВ в пределах одного скопления локализуются или в одной зоне роста кристалла, или в одной залеченной трещине. Для включений в одном скоплении характерна одинаковая морфология, состав и соотношение фаз. Работа со скоплениями ГЖВ позволяет оценивать степень изменения содержимого включений поздними процессами, и таким образом верифицировать данные, полученные при проведении детальных исследований. Одним из наиболее доступных и одновременно чувствительных показателей степени изменения содержимого включений является температура гомогенизации в пределах одного скопления. Также допускается использование иных температурных характеристик, которые можно определить с высокой точностью – температуру частичной гомогенизации, температуру плавления газогидрата или таяния последней льдинки. Таким образом, предварительное изучение препарата для проведения исследования ГЖВ включает в себя выделение скоплений ГЖВ и выяснение их относительного времени образования [Goldstein, Reynolds, 1994].

Индивидуальные газово-жидкие включения были изучены на термокриостолке Linkam THMSG-600 в Институте геологии и геохимии УрО РАН. Солевой состав раствора определялся по температуре эвтектики [Борисенко, 1977]. Все включения принадлежат к системе H_2O-CO_2-NaCl . Концентрация соли в них оценивалась по температуре плавления газогидрата для системы [Diamond, 1992]. Присутствие CO_2 определялось по поведению газового пузырька при охлаждении. Плотность углекислоты рассчитывалась по уравнению линии равновесия жидкость-пар.

Микроэлементный состав жидкой фазы индивидуальных включений определялся методом LA-ICP-MS (квадрупольный масс-спектрометр Agilent 7500ce с системой лазерной абляции Excimer Lambda Physik GeoLas 193 нм) в лаборатории исследования флюида Политехнического университета и института Штата Вирджиния, США. Для расчета абсолютных содержаний элементов использована программа AMS 1.1.0 [Mutchler et al., 2008].

В качестве примера, иллюстрирующего возможности метода, рассмотрен образец кристалла кварца из карьера Изоплит, Шарташского гранитного массива, предоставленный С. В. Прибавкиным. В основании кристалла (рис. 1) содержится большое количество вторичных включений, изучение которых осложнено тем, что препарат с целью сохранения крупных включений был подготовлен толщиной более 0.5 мм. Поэтому изучены были включения, характеризующие заключительный момент роста кристалла и преобразования, связанные с захватом вторичных включений.

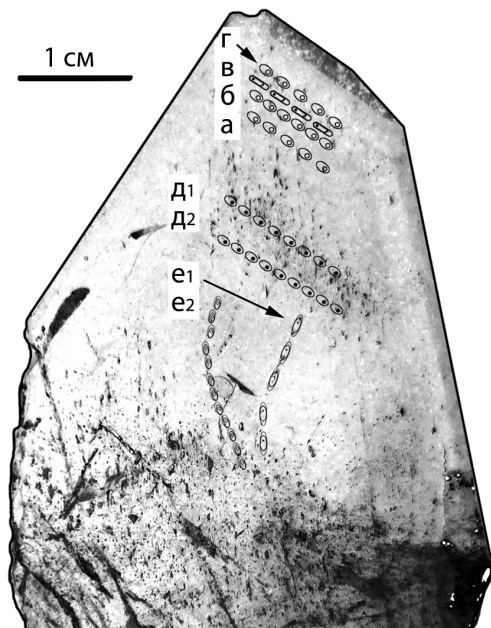


Рис. 1. Схема кристалла, демонстрирующая расположение изученных скоплений ГЖВ. А–Г – первичные, Д1, Д2, Е1, Е2 – псевдвторичные включения.

ГЖВ в кристалле по размерам изменяются в от 10 мкм до 1.5 мм. В корне кристалла присутствует скопление вторичных ГЖВ, и их исследование не проводилось. Изученные 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 CO_2 во включении от 40 до 90 об. %. С учетом того, что все включения содержат большую долю CO_2 и нередко имеют большие размеры, температура гомогенизации ГЖВ не измерялась, чтобы избежать растрескивания (декрепитации) всех ГЖВ в образце. Как указано в работе [Ляхов и др., 1995], температура декре-

питации зависит от множества факторов и не имеет прикладного применения для генетической интерпретации, но ГЖВ с высокоплотной фазой CO_2 , в большинстве случаев декрепитируют, не достигнув гомогенизации.

Скопления ГЖВ, обозначенные на рисунке 2 от А до Г, отнесены к первичным на основании того, что расположены в зонах роста кристалла, и в редких случаях имеют

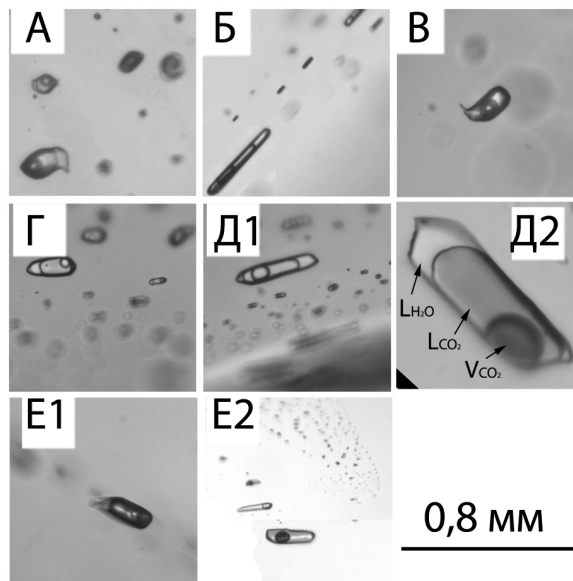


Рис. 2. Фотографии исследованных газожидких включений при комнатной температуре. Буквами L и V для включения Д2 обозначены жидкие и газовые фазы соответственно.

захваченные при росте кристалла иглы рутила. Скопления ГЖВ, отнесенные к псевдодубличным (Д1, Д2, Е1, Е2), располагаются вне зон роста по залеченным трещинам, и при этом не выходят за пределы поверхностей роста, заключенной внутри кристалла.

В таблице представлены результаты изучения скоплений ГЖВ. Температура плавления CO_2 не соответствует температуре плавления чистой CO_2 -56.6 °С, что свидетельствует о наличии примеси газов с низкой температурой кипения, возможно CH_4 или N_2 .

Оценка степени изменения производилась по температуре частичной гомогенизации, и для каждого скопления ГЖВ отличие не превышало погрешность измерения 0.1 °С. Таким образом, это демонстрирует отсутствие поздних изменений захваченного флюида. Произведенный анализ его состава позволяет проследить эволюцию флюида кристалла, и подтверждает широкую вариативность рудообразующего флюида гидротермальных жил.

Т а б л и ц а

**Результаты термометрии и определения состава включений
методом LA-ICP-MS**

	Е1	Е2	Д1	Д2	А	Б	В	Г
Характер захвата ГЖВ	Скопления псевдодубличных ГЖВ				Скопления первичных ГЖВ			
Доля CO_2 об. %	80	50	70	80	80	70	60	70
$T_{\text{плав. CO}_2}$, °С	-57	-56.9	-57.9	-58	-57.2	-57.4	-57	-57.5
$T_{\text{газ.}}$, °С	3.2	1.3	5	8.6	3.5	8.1	8.1	7.1
$T_{\text{гом. CO}_2}$, °С	19.9	26.9	27	15.3	27.3	29.6	20.1	23.4
NaCl-экв., мас. %	11.6	14.1	9	2.8	11.2	3.7	3.7	5.5
Плотность включения, г/см ³	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. $T_{\text{плав. CO}_2}$ – температура плавления CO_2 ; $T_{\text{газ.}}$ – температура плавления газогидрата CO_2 ; $T_{\text{гом. CO}_2}$ – температура частичной гомогенизации.

Предлагаемая методика анализа, в которой рассматриваются скопления ГЖВ с уточнением их относительного времени захвата, позволяет более детально описывать эволюцию минералообразующей среды, нежели классическая, в которой выделяются первичные, первично-вторичные и вторичные включения. Также, методика дает возможность оценить степень изменения включений поздними процессами, что крайне важно знать при работе с включениями.

Автор выражает благодарность С. В. Прибавкину, В. В. Мурзину и Р. Дж. Боднару. Исследование осуществлялось при финансовой поддержке УрО РАН (грант № 10-5-НП-400).

Литература

- Борисенко А. С.* Изучение солевого состава газово-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. 1977. № 8. С. 16–27.
- Ермаков Н. П.* Геохимические системы включений в минералах. М.: Недра, 1972. 175 с.
- Ляхов Ю. В., Павлунь Н. Н., Пизнюр А. В., Попивняк И. В.* Термобарогеохимия золота (прогнозирование, поиски и оценка оруденения) / Под ред. *Е. М. Лазанько*. Львов: Свит, 1995. 279 с.
- Реддер Э.* Флюидные включения в минералах. М.: Мир, 1987. Т. 1. 559 с.
- Diamond L. W.* Stability of CO₂ clathrate hydrate + CO₂ liquid + CO₂ vapour + aqueous KCl–NaCl solutions: Experimental determination and application to salinity estimates of fluid inclusions // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1992. Vol. 56. № 1. P. 273–280.
- Goldstein R. H., Reynolds T. J.* Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals / *Sepm short course 31*. SEPM, 1994. 199 p.
- 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*, 2008. P. 318–327.
- Roedder E., Bodnar R. J.* Fluid inclusion studies of hydrothermal ore deposits // *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. 1997. P. 657–697.
- Wilkinson J. J.* Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits // *Lithos*. 2001. Vol. 55. № 1–4. P. 229–272.