

ТРУДЫ ВНИИП

ТОМ II

Выпуск 2

ИССЛЕДОВАНИЯ МИНЕРАЛООБРАЗУЮЩИХ РАСТВОРОВ

МОСКВА 1958

ТРУДЫ

ВСЕСОЮЗНОГО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
ИНСТИТУТА
ПЬЕЗООПТИЧЕСКОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

ТОМ II

ВЫПУСК 2

ИССЛЕДОВАНИЯ МИНЕРАЛООБРАЗУЮЩИХ РАСТВОРОВ
(ПО ВКЛЮЧЕНИЯМ)

1272

ВНИИП
6-е Главное Управление

МОСКВА 1958

Редакционная коллегия:

доктор геол.-мин. наук Н. П. Ермаков (отв. редактор), Е. Я. Кнев-
ленко (зам отв. редактора), Г. В. Бабанов (отв. секретарь), канд.
техн. наук В. В. Вершинин, О. П. Комаров, канд. геол.-мин. наук
М. М. Хотенок, Л. И. Цинобер, А. А. Шапошников

Настоящий очередной тематический сборник «Трудов ВНИИП», как и выпуск 2 тома I, целиком посвящается исследованиям минералообразующих растворов. Он в основном отражает работы, выполненные в 1957 г. во ВНИИП, ВИМС, ВСЕГЕИ, институтах Академии Наук СССР, УССР и УзССР, Московском и Львовском университетах.

Ряд статей сборника посвящен методам и технике исследования включений и, в частности, аппаратуре для их термозвукового анализа. Большая часть статей освещает те или иные аспекты применения разработанных методик к изучению месторождений и кристаллов пьезокварца, турмалина, оптического кальцита и флюорита, а также синтетического кварца.

В. л. А. КАЛЮЖНЫЙ

КРИВЫЕ ГОМОГЕНИЗАЦИИ В МИНЕРАЛОГИЧЕСКОЙ ТЕРМОМЕТРИИ И ИХ ПОСТРОЕНИЕ

Жидкие включения в минералах представляют собой остатки минералообразующей среды, которые с физико-химической точки зрения являются сложными, закрытыми для количественных изменений системами, находящимися при постоянных условиях в равновесии. Эти, обычно гетерогенные в поверхностных условиях, системы почти всегда переводятся нагреванием в гомогенные. Кривые гомогенизации, которые строятся в координатах: объемное соотношение фаз — температура, дают объективное суждение о последовательном ходе процесса гомогенизации включений (2).

Характер кривых гомогенизации, фиксирующих изменения фаз во включениях при нагревании, зависит от многих обстоятельств, но основная причина, обуславливающая ход кривых, состоит в начальном агрегатном состоянии среды минералообразования.

Рассмотрим состояние включения в минерале, как двухфазовой одноконтактной системы вода — пар, находящейся при данных постоянных условиях в равновесии.

Введем следующие обозначения: W — общий объем включения, L — объем воды во включении, G — объем пара, M — общая масса воды и пара, $M_{ж}$ — масса воды, $M_{г}$ — масса пара, $V_{ж}$ — удельный объем воды, $V_{г}$ — удельный объем пара.

Очевидно, для такого включения будет действительной система уравнений:

$$\begin{aligned} L + G &= W, \\ M_{ж} + M_{г} &= M. \end{aligned}$$

Подставляя во второе уравнение соответственно значения $M_{ж} = \frac{L}{V_{ж}}$ и $M_{г} = \frac{G}{V_{г}}$, решаем систему относительно L , что дает:

$$L = \frac{MV_{ж}V_{г} - WV_{ж}}{V_{г} - V_{ж}}. \quad [1]$$

Полученная зависимость действительна не только для системы вода — пар, но и для каждой закрытой насыщенной системы с двумя фазами. Пользуясь общей формулой [1], можно построить кривые гомогенизации для включений в минералах с различным соотношением фаз, начиная с любой температуры, при которой существует данная система. Необходимо лишь знать величины удельных объемов фаз и изменение общего объема включения при изменении температуры. Первые две величины для насыщенной системы вода — пар достаточно хорошо извест-

ны из литературы (1, стр. 198); объемное терморасширение для некоторых минералов также известно [1]. Правда, все эти данные определены только для точек через больший или меньший интервал (например, для кривой насыщения вода — пар через 10—20°). Но кривые, построенные по этим данным, дают возможность с достаточной точностью определять величины $V_{ж}$, V_2 , W и для промежуточных точек.

Рассмотрим пример. Пусть нам необходимо построить кривую гомогенизации для включения, имеющего при комнатной температуре (20°) соотношение фаз вода — пар, равное 90 : 10. Для простоты расчетов допустим, что объем включения остается неизменным при повышении температуры.

1. В этих условиях при 20° будет действительным уравнение [1], которое для облегчения расчетов можно записать в таком виде:

$$M = \frac{L(V_2 - V_{ж}) + W V_{ж}}{V_2 V_{ж}} \quad [1-a]$$

Подставляя известные величины [1] в правую часть уравнения, определяем массу, постоянную при любых условиях существования данного включения как закрытой системы.

$$M = \frac{90(57824 - 1,002) + 100 \cdot 1,002}{57824 \cdot 1,002} = 89,82.$$

2. Определяем удельный объем при температуре гомогенизации включения:

$$V = \frac{W}{M}; \quad V = \frac{100}{89,82} = 1,133.$$

3. По табл. 1 или по графику, построенному на данных этой таблицы, находим температуру, при которой включение заполнится одной из фаз. Для нашего примера она равна 169°.

4. Подставляя в правую часть равенства [1] значения $V_{ж}$ и V_2 при температурах от 0° до температуры гомогенизации, находим процент наполнения включения водой при каждой из этих температур, чем и определяем положение точек кривой гомогенизации на диаграмме соотношения фазы — температура. При этом величины M и W остаются постоянными. Так, при 40° включение будет иметь следующий объем воды:

$$L = \frac{89,82 \cdot 19543 \cdot 1,008 - 100,1 \cdot 1,008}{19543 - 1,008} = 90,53.$$

При 60°:

$$L = \frac{89,82 \cdot 7678,3 \cdot 1,017 - 100 \cdot 1,017}{7678,3 - 1,017} = 91,34$$

и т. д.

Таким способом построено двадцать кривых гомогенизации, которые показаны на рис. 1. Для этих кривых начальное соотношение фаз взято при комнатной температуре (20°), а процент наполнения включения водой при 0° определен согласно формуле [1]*.

Данные расчетов наполнений включений водой для разных температур в процессе их гомогенизации сведены в табл. 1 и 2.

* Первые аналогичные кривые были построены совместно В. С. Соболевым Н. П. Ермаковым в 1951 г. Редакция.

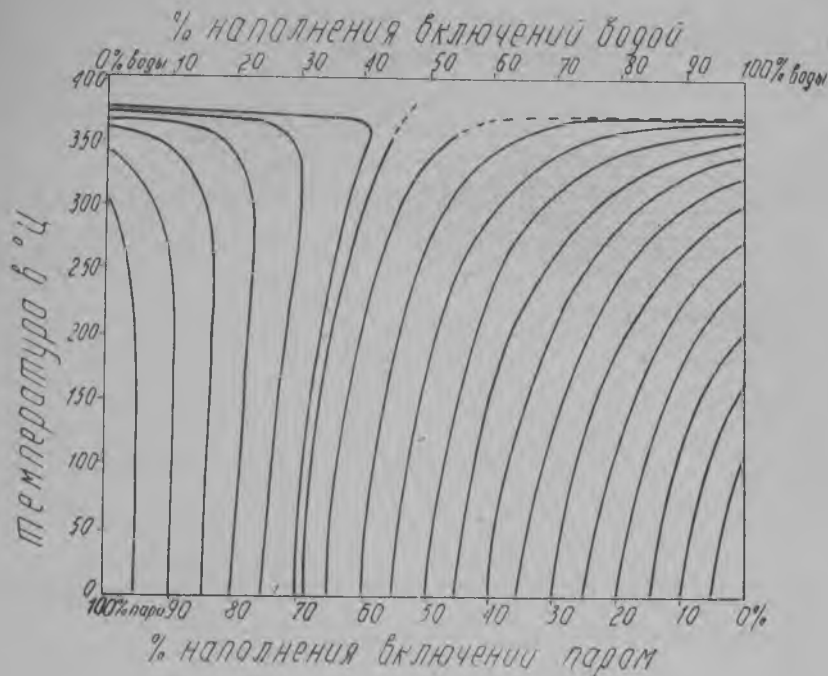


Рис. 1. Кривые гомогенизации включений воды, рассчитанные по экспериментальным данным для насыщенной системы вода—пар (при неизменяемом объеме)

Пользуясь формулой II, нетрудно выявить критическое соотношение фаз для закрытой системы вода — пар. Для этого нужно определить массу по известному критическому удельному объему ($M = W : V_{кр}$) и подставить ее значение, а также значения удельных объемов воды и пара для температуры, при которой мы желаем определить соотношение фаз, в формулу II. Таким образом, находим, что критический объем воды при комнатной температуре для закрытой насыщенной системы при неизменяемом объеме полости равняется 31,335%.

Расчет кривых гомогенизации можно несколько сократить, если начальное соотношение фаз брать не при комнатной температуре, а при 0°. Тогда общая масса включения по абсолютной величине практически равна объему жидкой фазы при 0°. Например, если при 0° имеем 90% воды во включении, то общая масса равна 90,000005; при заполнении включения 10% жидкой фазы общая масса равна 10,000004. Таким образом, с вполне достаточной точностью в формулу II можно вместо M подставлять абсолютное значение объема воды при 0°.

Но самый простой способ построения системы кривых гомогенизации вытекает из одной особенности их. Эту особенность можно сформулировать так: если начальные объемы воды ряда включений при одной температуре разнятся на одну величину (в %), то и при любой другой температуре разности объемов жидких фаз соседних включений равны; иными словами, прямые, проведенные параллельно оси абсцисс, делятся кривыми гомогенизации таких включений на равные отрезки (см. рис. 1).

Докажем эту особенность.

Вполне ясно, что для включений чистой воды в термонеизменяемых

Таблица 2

Сравнительная таблица температур гомогенизации включений воды в минералах и термонеизменяемых объемах

№ № п/п	% наполнения водой при 20°	Теоретические температуры гомогенизации включений		
		в термонеизме- няемой среде	в топазе	в кварце
1	100,0	20,0	20,0	20,0
2	95,0	114,0	115,0	118,0
3	90,0	169,0	171,0	175,0
4	85,0	214,0	216,0	219,5
5	80,0	250,0	252,5	256,0
6	75,0	281,0	283,0	286,0
7	70,0	306,5	308,0	310,5
8	65,0	327,0	328,0	330,0
9	60,0	343,0	344,0	345,0
10	55,0	353,0	355,5	357,0
11	50,0	364,0	365,0	365,5
12	45,0	369,0	369,5	370,0
13	40,0	372,0	372,0	372,0
14	35,0	373,5	373,5	373,0
15	31,871			374,1*
16	31,524		374,1*	
17	31,335	374,1*		
18	30,0	373,8	373,8	373,8
19	25,0	372,5	372,5	372,0
20	20,0	368,5	368,5	368,0
21	15,0	362,0	362,0	361,0
22	10,0	344,0	344,0	343,0
23	5,0	304,5	304,0	303,5
24	0,0	20,0	20,0	20,0

* Критическая температура.

объемах процесс и температура гомогенизации не зависят от формы и размеров включений, а только от соотношения объемов отдельных фаз, т. е. включения с одинаковым соотношением фаз гомогенизируются по одному типу и при равных температурах. Следовательно, для доказательства можно взять ряд включений: 1, 2, 3, . . . , n , которые имеют одинаковую форму и равные объемы. Пусть при температуре T° жидкая фаза занимает соответственно L , $L-x$, $L-2x$, . . . , $L-(n-1)x$ процентов объема этих включений, т. е. разности объемов жидкой фазы соседних включений равны x %. Нетрудно заметить, что общие массы этих включений также разнятся на одну величину. Тогда при температуре T_1° жидкая фаза во включениях 1, 2, 3, . . . , n будет занимать следующий объем:

$$L' = \frac{M'v_{ж}v_2 - Wv_{ж}}{v_2 - v_{ж}}, \quad L'' = \frac{M''v_{ж}v_2 - Wv_{ж}}{v_2 - v_{ж}}$$

$$L''' = \frac{M'''v_{ж}v_2 - Wv_{ж}}{v_2 - v_{ж}}, \dots$$

Объемы воды в соседних включениях при температуре T_1° будут различаться:

$$L' - L'' = \frac{v_{ж}v_2(M' - M'')}{v_2 - v_{ж}}, \quad L'' - L''' = \frac{v_{ж}v_2(M'' - M''')}{v_2 - v_{ж}}, \dots \quad [2]$$

Очевидно, все эти выражения тождественны $L' - L'' = L'' - L''' = \dots$ потому, что удельные объемы воды и пара при одной температуре и разности масс $M' - M''$, $M'' - M'''$, ... — равны, т. е. разности объемов жидкой фазы соседних включений при температуре T_1° равны, что и требовалось доказать.

На основании доказанной особенности можно предложить следующий очень простой графоаналитический метод построения системы кривых гомогенизации:

1. При помощи формулы [1] в изложенном выше порядке строим одну кривую гомогенизации, например, для включения, которое имеет 30% жидкой фазы при 20° .

2. С помощью формулы [1-а] определяем массу соседнего включения, например, с наполнением 25% жидкой фазы при 20° .

3. Рассчитываем разность объемов воды этих двух включений для ряда температур по формуле [2].

4. Откладываем отрезки, равные рассчитанным разностям, вдоль линий, проведенных параллельно оси абсцисс на расстояниях от нее, равных соответствующим значениям температур.

5. Соединяем найденные точки плавными кривыми.

При достаточной степени точности расчетов по приведенным выше формулам, прибавляя и вычитая вычисленные разности от соответствующих значений абсцисс каждой точки соседних рассчитанных кривых гомогенизации, можно найти цифровое выражение наполнения включений водой при данной температуре. Температуры гомогенизации могут быть найдены графически или определены указанным выше способом (пп. 2 и 3).

Рассмотрим характер гомогенизации включений чистой воды в некоторых минералах. Пользуясь данными объемного расширения при изменении температуры [1], легко построить систему кривых гомогенизации для разных минералов. Ход кривых мало отличается от рассмотренных выше. Незначительны отклонения также в значениях температур гомогенизации (табл. 2).

Из приведенных данных видно, что максимальная разность в температурах гомогенизации включений воды для неизменяемых объемов и кварца равна 6° , для топаза 4° . На незначительную величину изменяется критическое соотношение фаз. Так, при 20° критический объем воды для включений в термонеизменяемых объемах равняется 31,335, при тех же условиях для включений в топазе и кварце он соответственно равен 31,524 и 31,871 (см. табл. 2), т. е. критическое соотношение фаз мало заметно меняется за счет увеличения объема жидкой фазы.

Вследствие широкой распространенности включений, содержащих жидкую углекислоту, и возможного научного интереса, мы произвели расчет системы кривых гомогенизации для включений CO_2 . Использованы при этом значения удельных весов жидкой ($d_{ж}$) и газообразной (d_g) углекислоты, полученные Амага (6) экспериментальным путем (табл. 3). Для удобства расчетов формуле [1] был придан вид:

$$L = \frac{M - W d_g}{d_{ж} - d_g}$$

Полученные результаты сведены в табл. 4 и 5, а также даны в виде диаграммы (рис. 2).

На основании доказанной выше особенности системы кривых гомогенизации мы построили графоаналитическим способом еще 27 кривых

для включений CO_2 с начальным соотношением фаз, взятым при -50° (рис. 3). Для производства расчета основных кривых мы пользовались справочными данными (4, т. I, стр. 820).

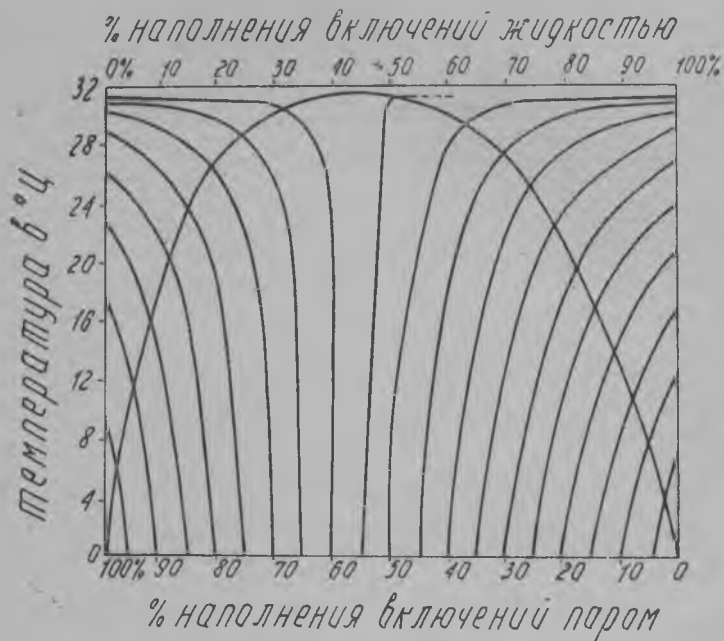


Рис. 2. Кривые гомогенизации включений углекислоты, рассчитанные по экспериментальным данным Амага (при неизменяемом объеме)

Сравнивая кривые гомогенизации для включений водных растворов, выведенные Н. П. Ермаковым экспериментально (2), с нашими теоретическими, замечаем, что они по своему характеру подобны. Подтверждается возможность гомогенизации включений в минералах в жидкой и газовой фазах. Кривая гомогенизации с точкой инверсии (2) является вполне закономерной; более того, все без исключения кривые для включений, которые гомогенизируются в газовой фазе, по существу имеют точки инверсии. Понятно, что для включений с малым наполнением водой экспериментально их выявить почти невозможно. Температуры гомогенизации естественных включений выше наших теоретических потому, что первые всегда представлены минеральными растворами.

Существует большое расхождение в величинах критического соотношения фаз H_2O — пар для экспериментальных и теоретических данных. В наиболее совершенных трубчатых включениях, для которых ошибка в определениях соотношения фаз не может превышать 2%, критическое наполнение включений водным раствором колеблется между 44—46%, следовательно, разница между экспериментальными и теоретическими определениями равна 13—15%. Непосредственно из экспериментальных данных такое расхождение трудно объяснить. Например, нет существенной разницы в процессах гомогенизации включения, содержащего при комнатной температуре 44% H_2O и 56% жидкой углекислоты (кварц из Донбасса) и включения, имеющего 44% водного раствора и 56% газовой фазы (топаз из Волыни); и первое и второе включения гомогенизируются «с критической точкой»; правда, существует значительная разница в

температурах гомогенизации — первое становится гомогенным при 262° , второе — 360° .

Особый случай представляют трубчатые включения в одном из кристаллов мориона, которые также иногда гомогенизируются с критическими явлениями. Например, одно из таких включений, содержащее при комнатной температуре 54% водного раствора и 46% газа, достигло гомогенного состояния при 332° . Перед производством термометрического анализа препарат с данным включением охлаждался до -4° , но жидкой CO_2

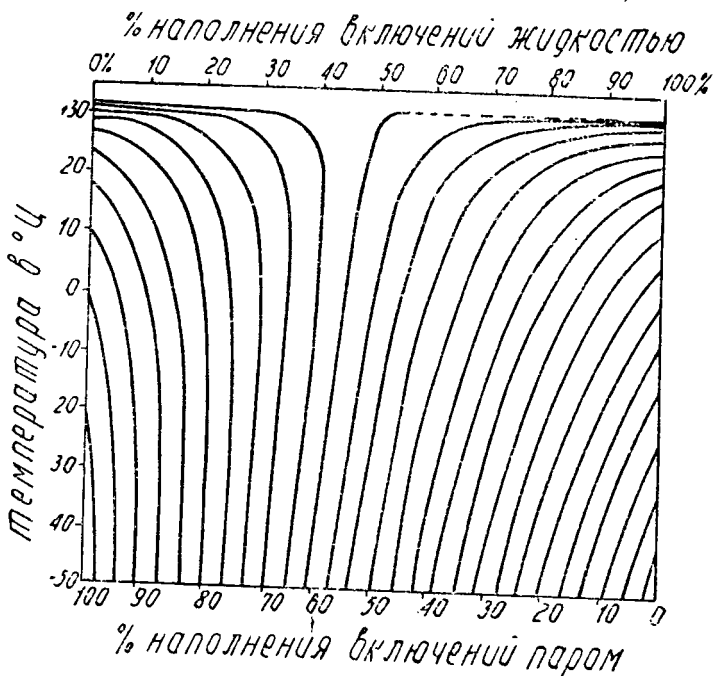


Рис. 3. Кривые гомогенизации включений углекислоты, рассчитанные графоаналитическим методом по экспериментальным данным

не было обнаружено. Несмотря на резко отличное соотношение фаз от приводившихся выше, гомогенизация происходила «с критической точкой». Однако в данном случае при температурах выше 200° наблюдалось расслаивание водного раствора на две несмешивающиеся жидкости. Количество второй высокопреломляющей жидкости при температуре гомогенизации достигало 7—10% объема всего включения (3).

Большая редкость наблюдения критических явлений не позволила нам подобрать соответствующие включения, которые содержали бы растворы различной концентрации относительно легко растворимых солей. Такой материал мог бы представить некоторые дополнительные данные по вопросу влияния концентрации солей на критическое соотношение фаз. Возможно, именно присутствие солей в растворе включений и создает расхождение расчетных и экспериментальных данных. Основанием к такому предположению послужили расчеты, основанные на некоторых общих термодинамических закономерностях и подтвержденные непосредственными результатами, полученными при изучении критического состояния растворов некоторыми исследователями.

Уравнение Ван-дер-Ваальса является уравнением третьей степени, и корни его при критическом соотношении параметров равны (5).

Таблица 3

Насыщение жидкость-газ для углекислоты (по Амага)

Т°	Плотность жидкой СО ₂ (в г/см ³)	Плотность газообраз. СО ₂ (в г/см ³)	Давление	Т°	Плотность жидкой СО ₂ (в г/см ³)	Плотность газообраз. СО ₂ (в г/см ³)	Давление
0	0,914	0,096	34,3	18	0,786	0,176	53,8
1	0,910	0,099	35,2	19	0,776	0,183	55,0
2	0,906	0,103	36,1	20	0,766	0,190	56,3
3	0,900	0,106	37,0	21	0,755	0,199	57,6
4	0,894	0,110	38,0	22	0,743	0,208	59,0
5	0,888	0,114	39,0	23	0,731	0,217	60,4
6	0,882	0,117	40,0	24	0,717	0,228	61,8
7	0,876	0,121	41,0	25	0,703	0,240	63,3
8	0,869	0,125	42,0	26	0,688	0,252	64,7
9	0,863	0,129	43,1	27	0,671	0,266	66,2
10	0,856	0,133	44,2	28	0,653	0,282	67,7
11	0,848	0,137	45,3	29	0,630	0,303	69,2
12	0,851	0,142	46,4	30	0,598	0,334	70,7
13	0,831	0,147	47,5	30,5	0,574	0,356	71,5
14	0,822	0,152	48,7	31,0	0,536	0,392	72,3
15	0,814	0,158	50,0	31,25	0,497	0,422	72,8
16	0,804	0,164	51,2	31,35	0,464	0,464	72,9
17	0,796	0,170	52,4				

Преобразуя в дальнейшем уравнение состояния, получим следующее соотношение:

$$\frac{RT_{кр}}{P_{кр} V_{кр}} = \frac{8}{3} = 2,67, \quad [3]$$

постоянное для всех веществ. Это критический коэффициент (5).

Уравнение [3] можно записать в таком виде:

$$V_{кр} = \frac{R}{2,67} \cdot \frac{T_{кр}}{P_{кр}}$$

Если постоянство R сохраняется в критической точке для воды и водного раствора слабой концентрации, то, используя данные Олендера и Лиандера (7) для критического состояния 5-процентного водного раствора NaCl ($P_{кр} = 354 \text{ кг/см}^2$ и $t_{кр} = 424^\circ$), критический объем для H₂O будет равен:

$$V_{кр} = \frac{R}{2,67} \cdot \frac{647}{224} = \frac{R}{2,67} \cdot 2,8$$

и для 5-процентного раствора

$$V_{кр} = \frac{R}{2,67} \cdot \frac{697}{354} = \frac{R}{2,67} \cdot 1,9$$

Из расчетов вытекает, что $V_{кр}$ для H₂O $>$ $V^{кр}$ для раствора NaCl.

Отсюда можно сделать вывод, что увеличение концентрации в водном растворе легко растворимых солей уменьшает величину критического объема, т. е. действует в сторону увеличения критического наполнения включений водным раствором.

Таблица 5

Температура гомогенизации включений углекислоты в термонеизменяемых объемах

№№ п/п	% наполнения жидкой CO ₂ при 0°	Теоретические температуры гомогенизации включений	№№ п/п	% наполнения жидкой CO ₂ при 0°	Теоретические температуры гомогенизации включений
1	100	0	12	44,99	31,35*
2	95	7,3	13	40	31,3
3	90	13,0	14	35	30,9
4	85	17,5	15	30	30,2
5	80	21,3	16	25	28,9
6	75	24,5	17	20	26,5
7	70	27,1	18	15	23,2
8	65	29,0	19	10	18,3
9	60	30,2	20	5	11,0
10	55	30,8	21	0	0
11	50	31,2			

* Критическая температура.

Однако наиболее убедительным подтверждением данного вывода являются результаты экспериментальных измерений Шроером критического наполнения для растворов разной концентрации (8). На графике, приведенном в указанной работе, отдельные кривые отвечают различной концентрации NaCl, KCl, KBr и т. д. Участки кривых, параллельные к оси ординат, соответствуют наблюдаемым во время эксперимента критическим явлениям раствора.

Непосредственно из графика следует, что с усилением концентрации NaCl и KCl повышается и относительная величина критического наполнения приблизительно в такой последовательности (табл. 6).

Таблица 6

Зависимость критического наполнения от концентрации растворов NaCl и KCl

NaCl		KCl	
концентрация в молях/л	пределы наполнения	концентрация в молях/л	пределы наполнения
0,0342	0,33—0,36	0,0342	0,33—0,37
0,0855	0,35—0,38	0,171	0,36—0,38
0,171	0,36—0,40	0,342	0,39—0,40

ЛИТЕРАТУРА

1. Берч Ф., Шерер Д. и Слайсер Г. Справочник для геологов по физическим константам. Изд-во ин. лит-ры, 1949.
2. Ермаков Н. П. Исследования минералообразующих растворов. Изд. Харьковск. ун-та, 1950.
3. Калужный В. А. Новые наблюдения фазовых превращений внутри жидких включений.— Минералог. сб. Львовского геол. об-ва, 1956, № 10.

4. Справочник химика, т. I. Госхимиздат, 1951.
 5. Штрауф Е. А. Молекулярная физика. М.-Л. Гостехиздат, 1949.
 6. Amagat E. H. Sur la détermination de la densité des gaz liquéfiés et de leurs vapeurs saturées. Comptes rendus, 1892, t. 114, p. 1093—98, 1322—26.
 7. Ölander A. a, Liander H. The phase diagram of sodium chloride and steam above the critical point. Acta Chem. Scand., 1950, vol. 4, № 9.
 8. Schröer E. Untersuchungen über den kritischen Zustand. Zeit. Phys. Chem., 1927, Bd. 129.
-

Е. Е. КОСТЫЛЕВА, В. А. ЛАБУНЦОВ

ИЗУЧЕНИЕ РАСТРЕСКИВАНИЯ КВАРЦА И УНИВЕРСАЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ-РЕГИСТРАТОР РАСТРЕСКИВАНИЯ¹

Как известно, метод растрескивания минералов применяется в минералогической термометрии и основывается на разрыве стенок газожидких включений вследствие резкого увеличения давления в жидкой фазе после заполнения ею всего включения при нагревании.

В основе метода растрескивания, как и метода гомогенизации, лежит положение Сорби, что флюид или жидкий раствор, захватываемые минералом при росте, представлены одной фазой и что при остывании замкнутого в минерале включения происходит падение давления с обособлением газобразной фазы в виде пузырька и иногда твердой фазы в виде кристаллика. Нагревание минерала с жидким включением вызывает обратный процесс — растворение кристаллика и уничтожение газовой фазы с заполнением вакуоли одной жидкой фазой. Температура, при которой образуется однородная гомогенная фаза, принимается в методе гомогенизации за минимальную температуру образования минерала (3, 7). Дальнейшее нагревание вызывает быстрое возрастание давления и разрыв стенок включений; температура, при которой происходит растрескивание, примерно принимается за температуру образования в методе растрескивания. Таким образом, метод растрескивания представляет собой особый вид фиксации явления гомогенизации, на котором основано определение температур образования минералов в работах Н. П. Ермакова (3) и его школы.

Как отмечается и в трудах Н. П. Ермакова (4), и в критических работах других исследователей, метод гомогенизации особенно пригоден для определения температур жидких, водных, не слишком концентрированных минералообразующих растворов, так как лишь в этом случае поправки на давление и концентрацию будут незначительны. Метод растрескивания требует также поправки на сопротивление стенок включений к разрыву, которое зависит от физических свойств минералов. Однако несомненно, ход растрескивания каждого минерала отражает особенности образования и может быть характерным для месторождений различных типов.

В поисках наиболее верных критериев для характеристики различных

¹ В работе принимали участие сотрудники отдела минералогии Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии АН СССР Т. К. Сухушина (минералогические и химические испытания) и А. Л. Дмитрик (получение кривых растрескивания).

типов жильного кварца, сопоставления кварцевых жил или отдельных генераций кварца и сравнения температурных интервалов его образования мы поставили себе задачу изучить закономерности растрескивания кварца разных месторождений.

Метод растрескивания не пользуется широким распространением. Впервые предложенный в 1948 г. Скоттом в установке примитивной конструкции, он применялся с тех пор главным образом для определения ориентировочных температур образования минералов. Наибольшее применение он имеет в США. В СССР этим методом с успехом пользуется Ю. А. Долгов во Львове (1). Регистрация растрескивания и температуры производится в его установке с помощью автоматического термовзвукорегистратора с записью растрескивания осциллографическим путем на фотобумагу. Помимо определения температур образования, метод растрескивания впервые применен Ю. А. Долговым и для расчленения осадочных толщ неогена Закарпатья (2). Совместно с электронно-микроскопическим изучением микропор кварца этот метод был использован в Японии для определения свойств кварцитов (6).

Поставленная задача изучения хода растрескивания минералов потребовала соответствующей аппаратуры. Ниже приводится краткое описание сконструированной нами установки, позволяющей оценивать эффект растрескивания по количеству происшедших взрывов включений и графически выявлять зависимость хода растрескивания от температуры.

* *

Установка состоит из усилителя-регистратора звуков растрескивания с микрофонным датчиком и электрической печи с термопарой и пирометром (рис. 1).

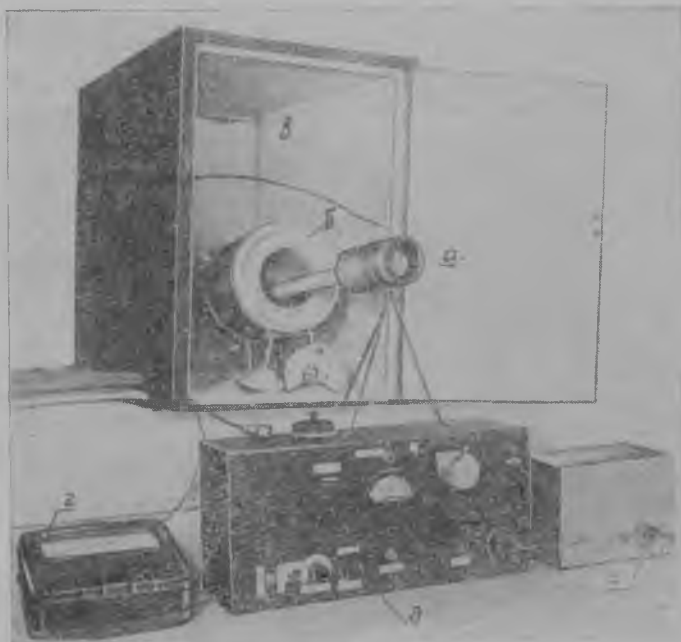


Рис. 1. Установка растрескивания:
 а — датчик с микрофоном; б — электропечь; в — экранированный шкаф; г — милливольтметр (пирометр);
 д — усилитель-регистратор; е — блок питания

Датчик представляет собой кварцевую трубку (размером 24×275 мм), на дно которой помещается исследуемая проба. Открытый конец трубки присоединен к электромагнитному микрофону (типа МЭД), вставленному в эбонитовую камеру. Закрытым концом трубка помещается в горизонтальную электрическую печь, подъем температуры в которой осуществляется автоматически через регулируемый автотрансформатор типа ЛАТР. С обратной стороны в печь вводится платинородиевая термopара, почти касающаяся трубки и присоединенная к милливольтметру (пирометру). Печь с датчиком помещена в экранированный шкаф. Появляющиеся в минерале при нагревании звуковые импульсы растрескивания превращаются микрофоном в электрические импульсы и передаются на усилитель-регистратор растрескивания.

Электронный усилитель-регистратор, схема которого приведена на рис. 2, производит: а) усиление сигналов растрескивания, получаемых с микрофонного датчика; б) преобразование их в стандартные импульсы, пригодные для регистрации электромеханическим счетчиком; в) интегрирование импульсов для регистрации их частоты следования; г) регистрацию импульсов. Прибор позволяет регистрировать: 1) непреобразованные усиленные сигналы растрескивания, получаемые с датчика в виде электрических импульсов различной амплитуды; этот вид регистрации назван режимом I; 2) стандартные «нормированные» импульсы, т. е. импульсы равной амплитуды и длительности, преобразованные из импульсов, получаемых непосредственно от датчика; данный вид регистрации мы называем режимом II; подсчет нормированных импульсов производится электромеханическим счетчиком; 3) частоту следования импульсов или количество импульсов в единицу времени; этот вид регистрации называется режимом III, или регистрации с интегрированием. Режимы регистрации устанавливаются при помощи переключателя.

Регистрация импульсов на приборе производится (рис. 1, д): а) с помощью расположенного на передней панели электромагнитного счетчика со стрелкой, передвигающейся от каждого пришедшего нормированного импульса на равное число делений; счетчик отмечает каждый пришедший импульс независимо от положения переключателя режимов работы; б) посредством стрелочного прибора; в режиме I каждый приходящий импульс вызывает резкое отклонение стрелки, пропорциональное амплитуде импульса; в режиме II на стрелочный прибор подаются нормированные импульсы, в связи с чем каждый импульс, независимо от его амплитуды, вызывает равные отклонения стрелки; наконец, в режиме III стрелка плавно отклоняется в зависимости от частоты следования импульсов; в) с помощью неоновой лампочки на передней панели, вспыхивающей от каждого импульса, независимо от режима работы.

Процесс растрескивания вместе с температурой может быть записан автоматически на фотобумаге шлейфовым осциллографом. Для его присоединения на лицевой панели прибора имеются гнезда. Форма записи осциллографом на фотобумаге зависит от режимов работы, на которые переведен переключатель, и аналогична показанию стрелочного прибора. Регистрация с помощью всех указанных средств (счетчика, стрелочного прибора, неоновой лампы и осциллографа) может производиться в одно и то же время. Таким образом, одновременно с автоматической записью осциллографом наблюдатель может производить подсчет растрескивания счетчиком. При небольшой переделке выходного каскада возможна также автоматическая запись растрескивания посредством электронного самопишущего потенциометра.

На рис. 2 показана схема электронного усилителя-регистратора (без

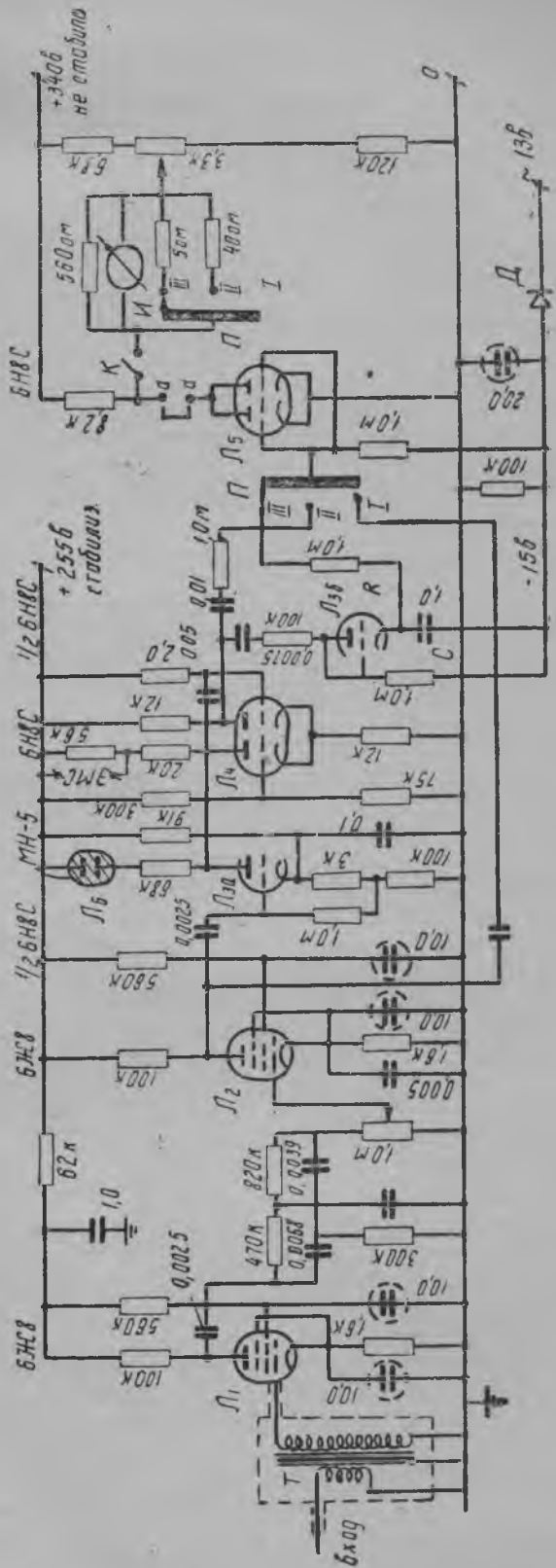


Рис. 2. Схема электронного усилителя-регистратора

блока питания), обеспечивающего указанные выше способы регистрации растрескивания. Прибор имеет следующие основные узлы: *а* — двухкаскадный усилитель на лампах L_1 и L_2 с включенным между каскадами фильтром, ослабляющим наводки на усилитель от сети 50 гц; *б* — ждущий мультивибратор на двойном триоде L_4 с буферной лампой L_3 , через которую осуществляется запуск мультивибратора; *в* — интегрирующая цепочка, на которую нормированные импульсы подаются от мультивибратора через диод L_{26} ; *г* — оконечный каскад на лампе L_5 . Двухкаскадный усилитель имеет коэффициент усиления около 6000 на частоте 1000 гц; импульсы от микрофона подаются на вход этого усилителя с помощью экранированного кабеля (длиной около 2 м) через согласующий трансформатор с коэффициентом трансформации 1 : 16. Регулировка чувствительности осуществляется потенциометром в цепи сетки L_2 . Ждущий мультивибратор осуществляет «нормирование» импульсов, что необходимо для их последующего интегрирования, а также для правильной работы электромеханического счетчика импульсов. От каждого импульса положительной полярности, подаваемого со второго каскада усилителя L_2 на сетку лампы L_{36} , мультивибратор совершает полный цикл колебаний и выдает один импульс с вполне определенной амплитудой и длительностью. Электромеханический счетчик ЭМС и неоновая лампочка L_6 , служащая световым индикатором импульсов, включены в анодной цепи левого (по схеме) триода мультивибратора. Переключатель П в трех разных положениях позволяет установить любой из трех режимов регистрации: в положении I на сетку лампы L_5 оконечного каскада подаются усиленные импульсы непосредственно со второго каскада усилителя L_2 , в положении II — нормированные импульсы с мультивибратора и в положении III — напряжение с интегрирующей цепочки, пропорциональное скорости следования регистрируемых импульсов. Шлейф электромагнитного осциллографа может быть включен в анодной цепи оконечного каскада (взамен переключки *а—а*). Измерительный прибор И подключается к лампе L_6 таким образом, чтобы при отсутствии импульсов его стрелку можно было бы установить на нуль¹. С помощью второй секции переключателя П при режимах II и III регистрации параллельно прибору М подключаются соответствующие шунтирующие сопротивления. В блоке питания, выполненном отдельно, применен обычный двухполупериодный выпрямитель на кенотроне 5Ц4С, обеспечивающий выпрямленное направление 320 : 340 в при токе около 60 ма. Это напряжение подается непосредственно для питания оконечного каскада. Для питания двухкаскадного усилителя и мультивибратора используется напряжение 255 в, снимаемое с двух последовательно включенных газоразрядных стабилизаторов типа СГ-4 и СГ-3, подключенных к выпрямителю через сопротивление 3000 ом. Отрицательное напряжение смещения — 15 в, подаваемое на сетку L_5 , получается посредством простого однополупериодного выпрямителя на германиевом диоде ДГЦ-2 со сглаживающим конденсатором 20,0 мкф. Нити накала всех ламп питаются переменным током. Усилитель смонтирован на дюралюминиевом шасси и помещен также в дюралюминиевый кожух. Наладка отдельных узлов и всего прибора в целом не представляет больших затруднений. Необходимо лишь обратить особое внимание на тщательность экранировки микрофона, входного трансформатора и сеточных цепей ламп L_1 , L_2 . Необходимо также обеспечить достаточно

¹ В настоящее время начата модернизация интегрирующего узла и выходного каскада усилителя, в которых предполагается применить соответственно интегрирующую цепочку с дозирующим конденсатором и параллельно-балансный каскад.

малые пульсации напряжения 255 в, питающего усилитель и мультивибратор.

Благодаря ряду принятых мер — а) экранировке печи, микрофонного датчика, входного трансформатора и самого усилителя; б) применению отдельного блока питания с газоразрядными стабилизаторами; в) применению в схеме усилителя фильтра, значительно ослабляющего наводки от сети 50 гц — оказалось возможным работать в обычных лабораторных условиях и при питании всей установки от сети переменного тока.

Практически растрескивание с помощью электромеханического счетчика производится путем отметки показаний счетчика через определенные интервалы температур (20 или 10°), т. е. отмечается прирост числа взрывов по сравнению с предыдущим интервалом температуры. Одновременно счетчик дает суммарный подсчет происшедшего растрескивания. Запись прироста растрескивания изображается по окончании опыта графически: на абсциссе отмечаются интервалы температур, на ординате — прирост растрескивания в данном интервале. Таким образом, анализ растрескивания испытуемого минерала счетчиком может быть выражен кривой и количеством импульсов за весь опыт и за определенные интервалы температур.

Анализ растрескивания с помощью осциллографа целесообразно вести параллельно с регистрацией растрескивания счетчиком; ввиду медленности самого процесса и его прерывистости надо включать осциллограф лишь при начинающемся нарастании растрескивания, т. е. на интервалы температур, отвечающие максимумам частот; при очень высокой интенсивности растрескивания запись осциллографом целесообразно вести на режиме III.

* *
*

Все приводимые ниже кривые растрескивания получались в одинаковых условиях; оптимальный диаметр зерен кварца для проведения анализов установлен опытным путем в 1 мм. Меньший размер зерен дает очень слабые эффекты растрескивания, но аналогичный ход кривой. Более крупный размер зерен затрудняет разрыв стенок включений и снижает число растрескиваний. Величина навески установлена в 3 г, что удовлетворяет кварцам со средним эффектом растрескивания. Для кварцев, обнаруживающих слабый эффект или совсем не дающих растрескивания, иногда приходится удваивать навеску. Нагревание во всех опытах производилось в интервале 0—600°, скорость нагрева составляла 10—12° в минуту. Регистрация растрескивания производилась через каждые 20°. Отсутствие помех в сконструированной установке проверялось неоднократно опытами, которые показывали хорошее совпадение.

Зависимость растрескивания от включений была проверена на хорошо образованном кварце Астафьевского месторождения Южного Урала. Корневая часть кристалла молочно-белого цвета дала интенсивное растрескивание с характерным ходом кривой и с максимальными частотами в интервале 240—260°. Головка кристалла, представляющая совершенно чистый, оптически прозрачный, дымчатый кварц, не дала никакого растрескивания.

В некоторых случаях кристалл может растрескиваться при нагревании и от ряда других причин, например, кварц-аметист из известняков Подольского месторождения в Подмосковье дал кривую растрескивания с рядом острых пик, не похожую на обычные кривые, отражающие это явление (рис. 3). Аномальность этой кривой доказана замедленным на-

гревом, при котором совершенно не обнаружилось растрескивания. В случае нормального растрескивания от включений всегда наблюдается повторение в ходе кривых. Замедленным нагревом неоднократно проверялись растрескивания испытуемых нами кварцев (рис. 4).

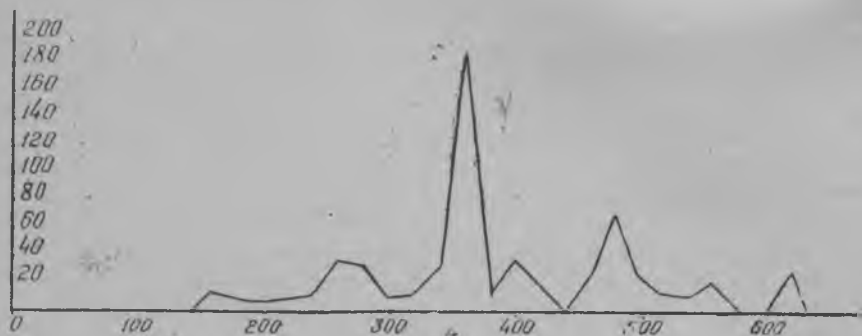


Рис. 3. Аномальное растрескивание кварца Подольского месторождения в Подмосковье

Регистрация растрескивания через меньшие интервалы температур, например через 10° , показывает более зигзагообразный ход кривой, при этом положение наибольшей частоты иногда получается несколько смещенным по сравнению с отсчетом через 20° . Зигзагообразность хода процесса при регистрации отсчетов через 10° указывает на прерывистость

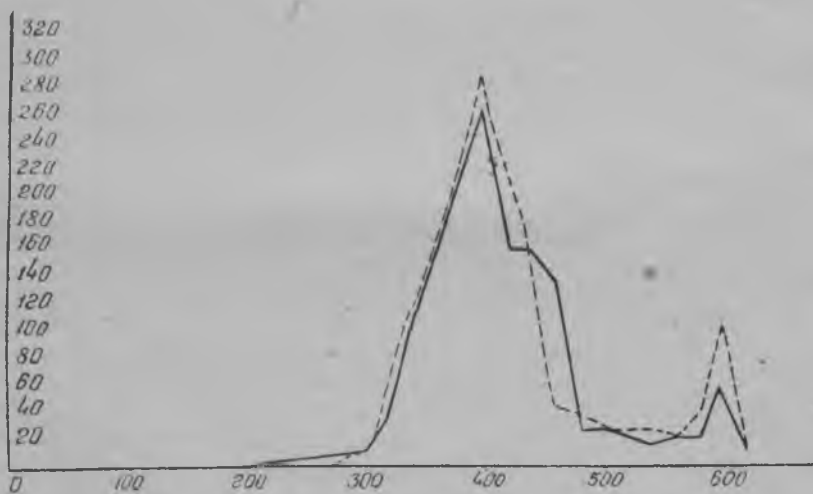


Рис. 4. Кривые нормального растрескивания при обычном и замедленном нагреве

растрескивания, что зависит от неравномерности состава включений, обусловленной, вероятно, характером их образования. Чем постояннее условия образования и спокойнее рост, тем меньше зигзагообразность хода кривой. Так, кривые растрескивания хорошо образованного полупрозрачного кристалла кварца из Микояновского месторождения при регистрации этого процесса через 20 и 10° очень близки. Кривые растрескивания массивного рудного кварца, записанные через интервалы 10° , очень часто сильно отличаются своим зигзагообразным ходом от кривой, записанной

через 20°, и для сравнения приходится проводить огибающую зигзагообразной кривой.

Опыты растрескивания были проведены на кварцах различных типов месторождений: пегматитов Волыни, Карелии и Мамы; кварцево-вольфрамово-молибденовых и касситеритовых жил Казахстана, Забайкалья и Приморья; «хрусталеносных» кварцевых жил Южного Урала, Алдана и Приморья; «пустых» согласных и секущих жил Полярного Урала. Всего было произведено около 300 опытов.

Приводимые ниже кривые растрескивания ряда кварцев различного генезиса (рис. 5—7) показывают большое разнообразие интенсивности этого явления в форме и ходе кривых растрескивания. Наибольшая интенсивность растрескивания проявлена кварцем из вольфрамового месторождения Батыстау в Казахстане (рис. 6, а, 7507 импульсов), кварцево-касситеритового Шумиловского месторождения в Забайкалье (4425 импульсов), Астафьевского месторождения на Южном Урале (рис. 7, а, 3700 импульсов), кварца из пегматитов Волыни (рис. 5, а, 1207 импульсов). Малые и ничтожно малые эффекты растрескивания обнаружили кварцы месторождения Мамы в Восточной Сибири (рис. 5, в, г, 20 и 40 импульсов), кварцево-касситеритового Хрустального месторождения (30 импульсов) и Вознесенского месторождения в Приморье (14 импульсов). Многие кварцы дают несколько подъемов или пиков растрескивания, например месторождение Джиды в Забайкалье (рис. 6, б). Очень часты добавочные пики растрескивания на 500—600°, например в месторождении Букука, Микояновском, Тетюхэ, Мама (рис. 5, г; 6, б, в, д).

Методом растрескивания можно определить различные генерации кварца. Так, молочно-белая корочка на дымчатом кварце месторождения Батыстау дала кривую, заметно отличающуюся своей интенсивностью и температурой растрескивания (рис. 6, а).

* *
*

Для выяснения получаемых эффектов растрескивания производилось микроскопическое изучение прозрачных шлифов и зерен кварца до и после проведения опытов. Кроме того, изучался ориентировочный суммарный состав включений путем определения удельного веса исследуемых кварцев, потери при прокаливании и выделения кварцем воды и возгонов при нагревании в трубке. Во всех случаях изучение производилось на зернах кварца величиной около 1 мм, отобранных под бинокулярной лупой.

Потеря при прокаливании определялась прокаливанием навески кварца в 1 г в электропечи до постоянного веса или на паяльном столе газовой горелки. Опытным путем установлено время прокаливании до постоянного веса: в электропечи около 1 часа, на паяльном столе около 1/2 часа (5). Изучение выделяемых кварцем воды и возгонов производилось для навески около 0,5 г в закрытой с одного конца трубке из тугоплавкого стекла, диаметром 0,5 см, куда вставлялась термопара, присоединенная к милливольтметру. Открытый конец трубочки для охлаждения покрывался полоской фильтровальной бумаги или слоем ваты, смоченной водой. Кончик термопары погружался в пробу испытуемого кварца; нагревание производилось на газовой горелке сначала в удалении от пламени с постепенным приближением к нему в интервалах 100°, 200—250, 300—350, 400—450 и 500—600°. Нагревание в пределах каждого интервала проводилось в течение 5—8 мин. При нагревании в трубке кварцы обнаруживают при разных температурах выделение воды (осаждающейся

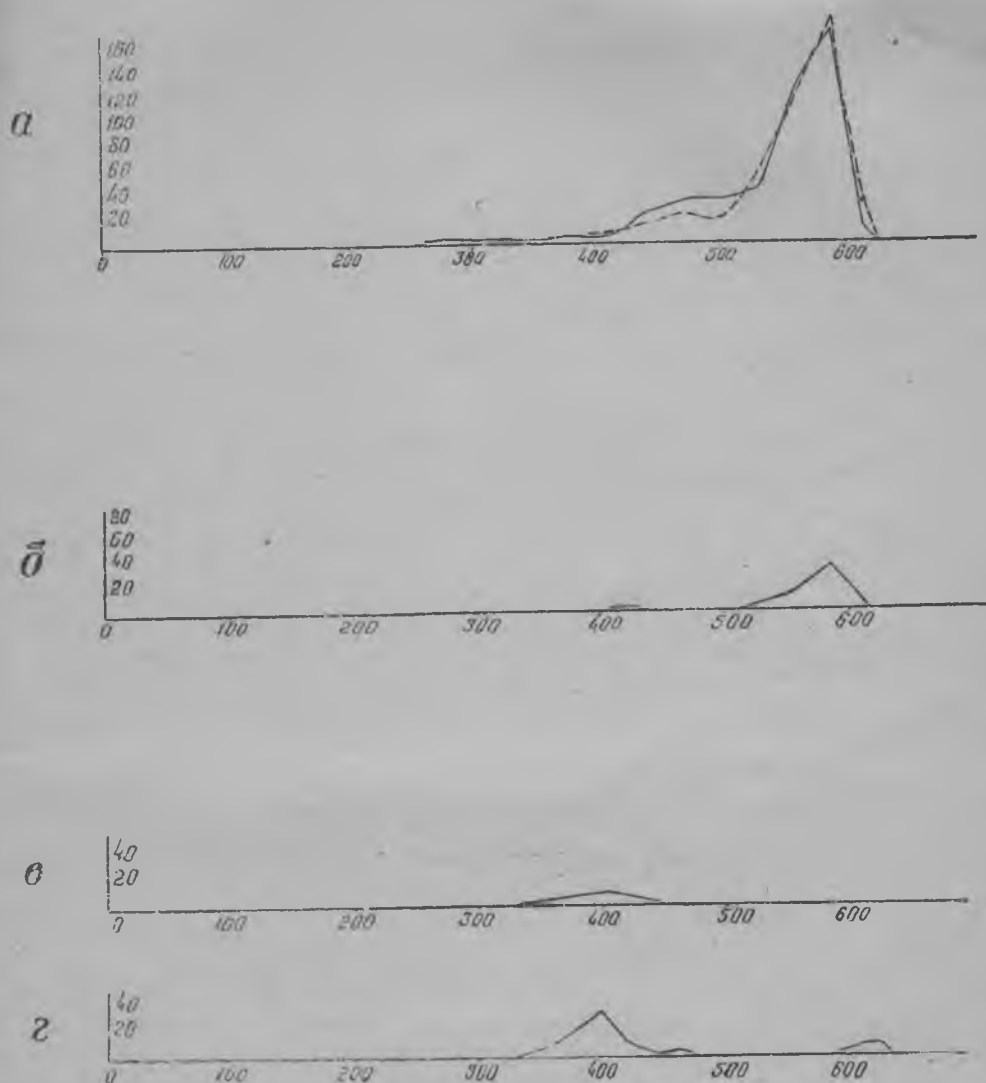


Рис. 5. Кривые растрескивания кварца из легматитов:
а — Волянь; б — Карелия (блоковый кварц); в — Мама, Восточная
Сибирь; г — Мама (кварцево-мусковитовый комплекс)

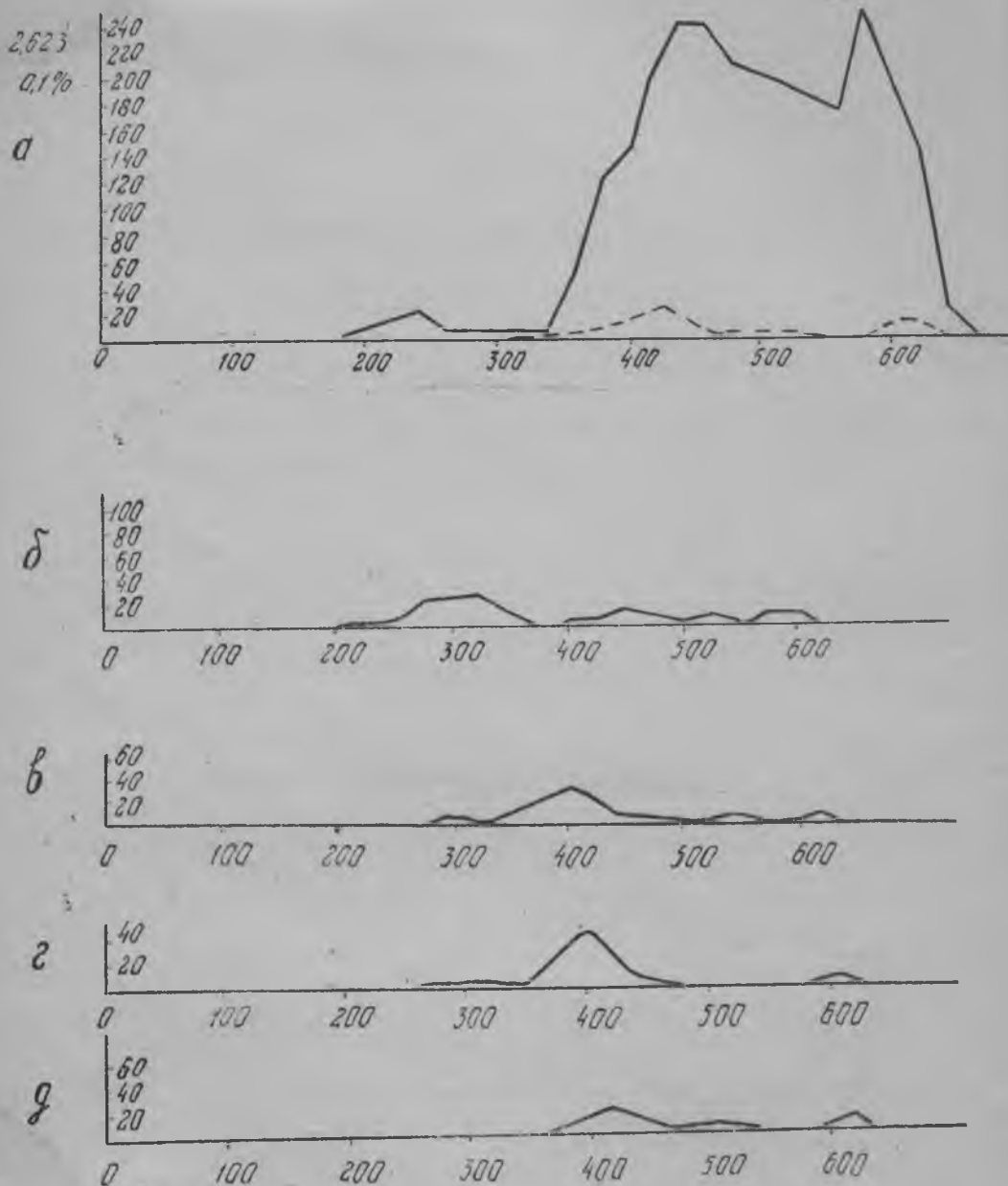


Рис. 6. Кривые растрескивания кварца из рудных жил:
 а — Батыстау, Казахстан (серый кварц, пунктир — корочка молочно-белого кварца); б — Джида, Забайкалье (кварц из полости вольфрамовой жилы); в — Джида кварц с бериллом и биотитом); г — Тетюхе (длинно-призматический кварц); д — Тетюхе (бипирамидальный кварц)

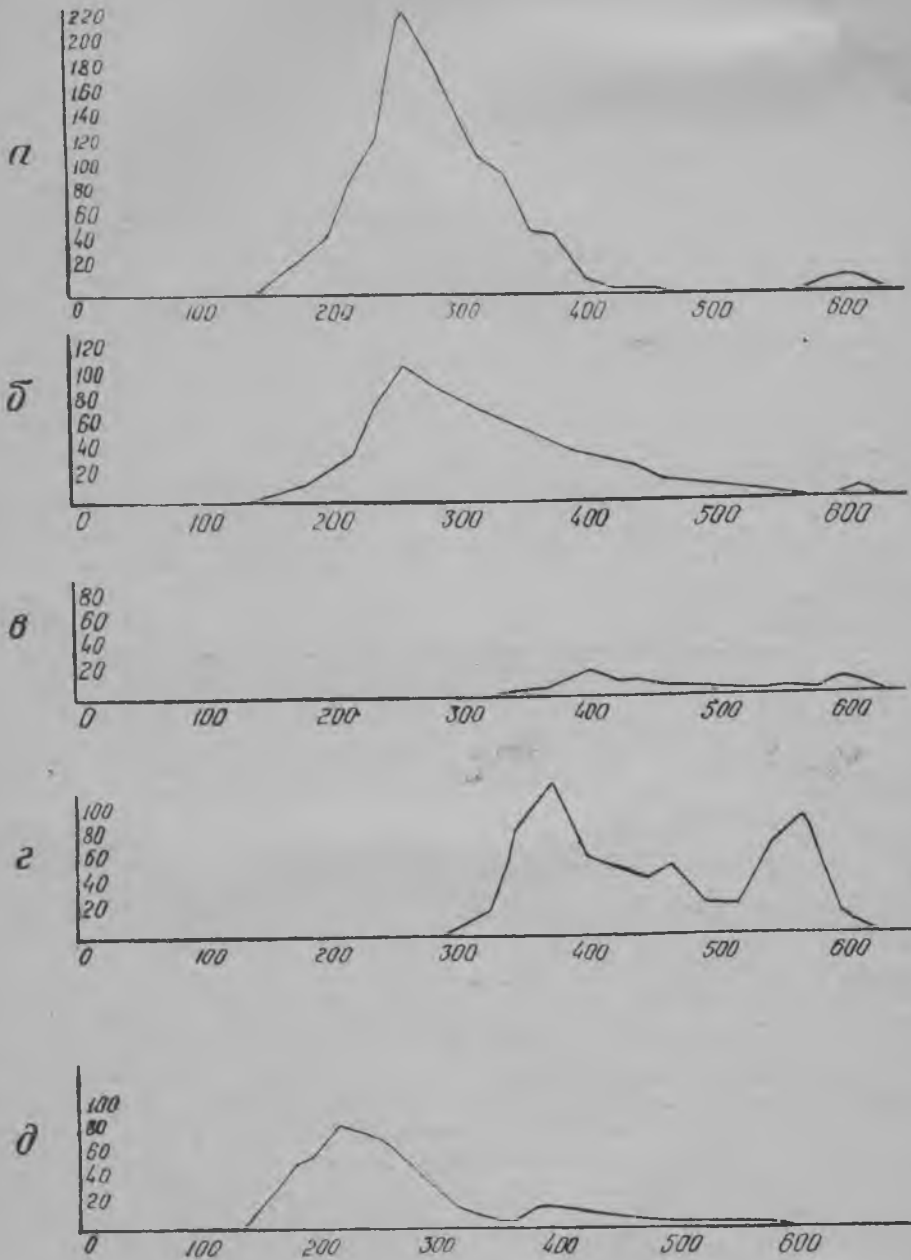


Рис. 7. Кривые растрескивания кварца из хрусталеносных жил:
a — Астафьевка, Южный Урал (жильный кварц); *б* — Астафьевка (корневая молочно-белая часть кристалла); *в*, *г* — Алдан;
д — Полярный Урал

в виде капелек или влаги в конце трубки) и летучие газы, дающие кольца возгонов на различном расстоянии от пробы. Температурные интервалы выделения воды и возгонов совпадают большей частью с эффектами растрескивания, как это видно на рис. 8.

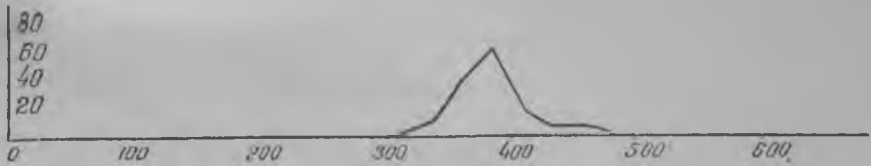


Рис. 8. Кривая растрескивания кварца Алдана и температуры выделения воды и возгонов

Сопоставление результатов изучения испытуемых кварцев помогает объяснить получаемые кривые растрескивания и приводит к следующим выводам.

1. Различие в интенсивности растрескивания зависит от количества и величины взорвавшихся включений. Во многих рудных кварцах наблюдаются мельчайшие однофазовые, по-видимому газовые, включения величиной порядка микрона или долей микрона; эти включения не растрескиваются при нагревании даже до 1000—1200°. Включения, величиной свыше 1 микрона, при нагревании до 600° растрескиваются не всегда.

С увеличением количества двухфазовых включений, размером свыше 1 микрона, растрескивание усиливается. Это следует из соотношения подсчитанного под микроскопом количества включений, содержащихся в 1 мм², и числа зарегистрированных растрескиваний:

Месторождение	Общее число включений 0,0001—0,001 мм	В том числе двухфазовые	Число растрескиваний
Мама, Восточная Сибирь	2900	100	45
Мама, кварцево-мусковитовый комплекс	13 100	500	225
Букука	24 000	810	375
Вознесенское, Приморье	39 000	—	14

2. Дополнительные пики при 580—620° и выше обусловлены запоздалым растрескиванием газовых включений. При этих температурах обычно наблюдается выделение только возгонов в трубке.

3. Выделение H₂O при нагревании в трубочке часто не регистрируется опытами растрескивания. Вероятно, эта вода находится не в составе жидких включений, а в капиллярных поровых пространствах гидротермальных кварцев.

4. Пологий продолжительный подъем на кривых вызывается растрескиванием вторичных газовой-жидких включений, которые не дают больших частот растрескивания, а сравнительно редкие и разрозненные импульсы. Крутой подъем на кривых, оканчивающийся пиком, отвечающим максимальной частоте растрескивания, вызывается первичными газовой-жидкими включениями. Чем более однороден состав первичных включений, тем круче подъем, острее и определеннее пик на кривой и круче спуск. Такой ход кривой наблюдался для некоторых хорошо образован-

ных кристаллов кварца. Пологий продолжительный спуск кривых растрескивания вызывается разнородными по составу и соотношению фаз включениями.

5. Температурная область максимумов частот растрескивания, вызываемая первичными включениями, характеризует генетический тип кварцев. Например, кварцы пегматитов Волыни и Карелии, а также рудный кварц пегматитового типа участка месторождений Батыстау (рис. 5, а, б; 6 а) характеризуются высокотемпературным положением максимума частоты растрескивания ($500\text{--}600^\circ$); рудные кварцы гипотермального генезиса имеют максимум частот растрескивания в области температур 400° и выше и дополнительные заметные пики при $500\text{--}600^\circ$, вызываемые газовыми включениями. Максимумы частот растрескивания кварцев «хрусталеносного типа» жил различны: $220\text{--}250^\circ$ (месторождение Южного Урала) и 400° (месторождение Алдана), что хорошо согласуется и отвечает различным генетическим условиям образования этих месторождений. «Пустые» кварцевые жилы Полярного Урала дают различные температуры максимумов растрескивания, что подлежит дальнейшему изучению.

В целом характеристика растрескивания кварцев может быть полезной при сравнении и корреляции кварцевых жил различного генезиса. Кроме того, по кривым растрескивания можно судить ориентировочно о генетическом типе кварца, количестве и размерах содержащихся в нем включений, их природе, а также наличии газовых включений и т. д.

В дальнейшем работа будет продолжена в направлении углубления и уточнения метода растрескивания, применения автоматической записи осциллографом при детализации максимумов частот растрескивания, изучения этим методом кристаллов кварца различного габитуса и генераций, а также применения данного метода на других минералах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Долгов Ю. А., Райхер Л. Д. Автоматический термовзвукорегистратор.—Минералог. сб. Львовск. геол. об-ва, 1953, № 7.
2. Долгов Ю. А. Расчленение термовзвукowym методом осадочных терригенных кварцсодержащих толщ неогена Закарпатья.—Геолог. сб. Львовск. геол. об-ва 1954, № 1.
3. Ермаков Н. П. Исследования минералообразующих растворов. Изд. Харьковск. ун-та, 1950.
4. Ермаков Н. П., Вл. А. Калужный. О возможности выявления истинных температур минералообразующих растворов.—Тр. ВНИИП, 1957, т. 1, вып. 2.
5. Ермаков Н. П. и Мязь Н. И. Влияние жидких и газовых включений на величину потерь при прокаливании минералов.—Тр. ВНИИП, 1957, т. 1, вып. 2.
6. Ивао, Акабори, Коидзуми, Минато. Электронная микрография некоторых кремниевых пород со специальным изучением микропор с флюидными включениями. J. Japan Assoc. Mineral. Petrol. and Econ. Geol., 1953, vol. 37, № 5 (на япон. яз., на англ. яз.). Реф. жур. Геология, 1956, т. 1, вып. 2.
7. Смит Ф. Г. Геологическая термометрия по включениям в минералах. Изд-во ин-та лит-ры, 1956

**А И ЗАХАРЧЕНКО, Н. С. ЛАЗАРЕВИЧ,
Г. И. МОСКАЛЮК, А. А. МОСКАЛЮК**

УПРОЩЕННЫЙ АВТОМАТИЧЕСКИЙ ТЕРМОЗВУКОРЕГИСТРАТОР

Проблема определения температур эндогенного минералообразования всегда была и ныне является очень актуальной при расшифровке генезиса месторождений полезных ископаемых и решении важнейших научных и практических задач прикладной геологии.

В 1948 г. Х. Скотт предложил определять температуру минералообразования методом разрыва жидких включений в минералах при их нагревании. Этот метод основан на том, что при нагревании жидких включений до температуры гомогенизации давление в них повышается относительно медленно и постепенно. Но сразу же после исчезновения газовой фазы даже незначительное повышение температуры вызывает резкое увеличение давления внутри включений, стенки их не выдерживают, и минерал-«хозяин» начинает разрываться — трескаться. Это хорошо видно на диаграммах удельных объемов воды в зависимости от температур и давлений, неоднократно приводившихся в различных работах (2, 3, 4, 5). Начало массовых разрывов примерно соответствует температуре гомогенизации жидких включений.

Основное достоинство метода разрывов заключается в том, что он прост и вместе с тем применим для исследования непрозрачных минералов.

Вначале фиксация разрывов жидких включений при нагревании производилась с помощью медицинского кардиографа путем подсчета экспериментатором количества щелчков (разрывов) в единицу времени. Однако возможности такого метода учета разрывов очень ограничены. За единицу времени (минуту) удается уловить резко раздельные, т. е. единичные, взрывы часто аномальных включений, что приводит к ошибкам и вносит элемент субъективности в результаты исследований.

В 1949 г. П. Питч для объективного учета разрывов предложил первый автоматический термозвукорегистратор. Он дал лишь краткое описание основных узлов установки без сколько-нибудь подробной схемы, по которой можно было бы ее воспроизвести, и использовал сложную дорогостоящую аппаратуру, не доступную для широкого круга исследователей.

В 1950 г. Ю. А. Долгов и Л. Д. Райхер (Львовский государственный университет) сконструировали более совершенный автоматический термозвукорегистратор, но тоже на основе сложных дорогостоящих аппаратов (осциллографов, сейсмографов).

Во Всесоюзном геологическом институте (ВСЕГЕИ) термометрическими методами исследований начали заниматься в 1949 г. Сначала был освоен метод гомогенизации, а в 1952 г. — метод разрывов с применением медицинского кардиографа. Затем было решено разработать относительно простую конструкцию автоматического регистратора, которую можно

было бы рекомендовать для массового производства и широких исследований.

Основные технические трудности при создании автоматического термовзвукорегистратора заключаются в следующем:

1. Возникающий при растрескивании минералов звуковой эффект настолько слаб, что для преобразования акустических сигналов в электрические необходимо применение высокочувствительного микрофона.

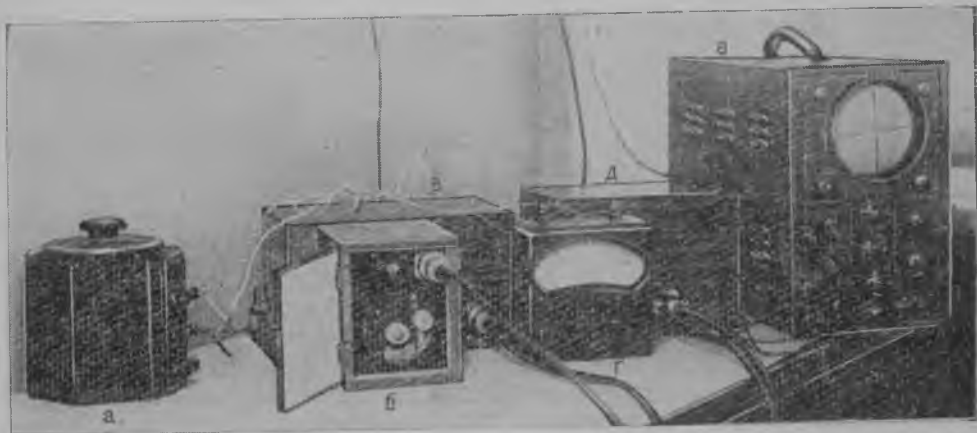


Рис. 1. Основные узлы термовзвукорегистратора:

А — регулятор нагрева печи типа ЛАТР; Б — электромагнитный самописец; В — усилитель; Г — гальванометр; Д — выпрямитель; Е — электронный осциллограф (для визуального наблюдения)

2. Микрофон должен быть устойчивым при нагревании образцов до 800° , т. е. до возможных температур природных минералообразующих флюидов.

3. Зарядная камера с находящимся в ней микрофоном должна быть не проницаема для посторонних звуков.

4. Прибор в целом должен быть надежным в работе, простым по конструкции, не требующим высококвалифицированного обслуживания.

При разработке отдельных узлов большое внимание обращалось на использование приборов серийного отечественного производства.

С учетом имеющихся отечественных и зарубежных конструкций была разработана схема и изготовлен экземпляр установки автоматического термовзвукорегистратора с использованием шлейфного и электронного осциллографов (но без сейсмографа). Этим термовзвукорегистратором были сделаны многие сотни замеров и расшифрованы температуры образования и изменения многих гидротермальных минералов. Результаты оказались вполне удовлетворительными.

После того как была разработана первая схема, к нам стали обращаться многие организации и отдельные исследователи, в том числе и из Чехословакии, Болгарии, Китая и других стран, с просьбой о замерах температур минералообразования в массовом количестве и помощи в изготовлении упрощенных автоматических термовзвукорегистраторов на местах. В 1957 г. во ВСЕГЕИ ускоренными темпами была спроектирована и изготовлена упрощенная схема автоматической установки, пригодная для массового производства.

Такой термовзвукорегистратор состоит из следующих конструктивных элементов, показанных на рис. 1 и 2.

1. Термопечь (рис. 2) представляет собою полый цилиндр *а*, вокруг которого намотана нагревательная спираль. Внутри находится кварцевая трубка *б*, диаметром 25—50 мм, запаянная с одной стороны, в которую помещается испытуемый минерал в измельченном виде. Над открытым концом трубки помещается микрофон.

В непосредственной близости от исследуемого минерала находится термопара, которая соединена с гальванометром, отградуированным по шкале Цельсия. В печи минерал можно нагревать до 800°. Для защиты микрофона от помех термопечь помещена в звуконепроницаемый шкаф *г*.

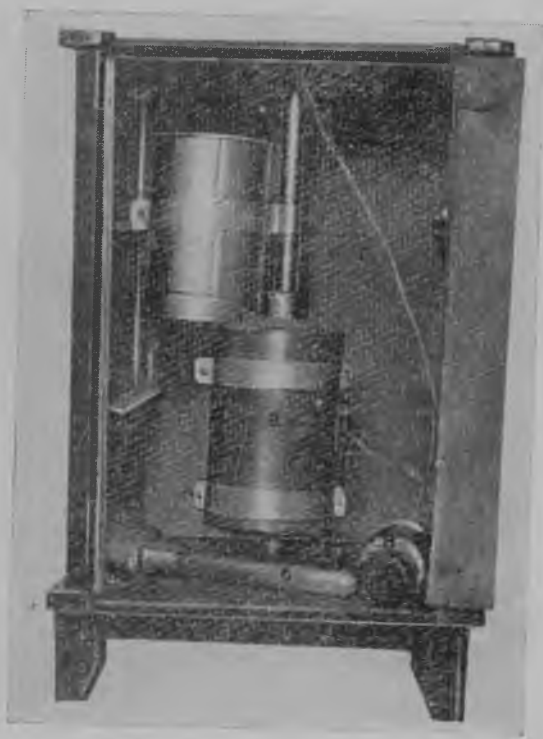


Рис. 2. Термопечь с зарядом:
а — цилиндр печи с обмоткой; *б* — кварцевая трубка; *в* — микрофон с изолятором;
г — звуконепроницаемый шкаф

2. Электронный усилитель (рис. 3) звуков растрескивания, принятых микрофоном, обеспечивает нормальную работу записывающего устройства. Усилитель трехкаскадный, низкочастотный, с полосой пропускания от 100 до 3000 гц. Коэффициент усиления $K=30\ 000$. В схеме применены лампы 6Ж4.

На выходе усилителя в качестве нагрузки стоит тиратрон ТГ-2050, в анодную цепь которого включено поляризованное реле РП-7. При срабатывании тиратрона реле своими контактами управляет электромагнитами записывающего устройства. Электроэнергию усилитель получает от сети переменного тока через отдельный выпрямитель.

3. Записывающее устройство. Для записи количества газрывов в зависимости от температуры минерала, а также для отметки температуры в регистраторе имеется записывающее устройство.

Взамен дорогостоящих и сложных осциллографов и сейсмографов разработан и изготовлен очень простой по конструкции самописец импульсов, электрическая схема которого дана на рис. 4.

Самописец имеет электродвигатель типа СД-2, на оси которого посажена приемная кассета. На лицевой панели имеется зарядная кассета, в

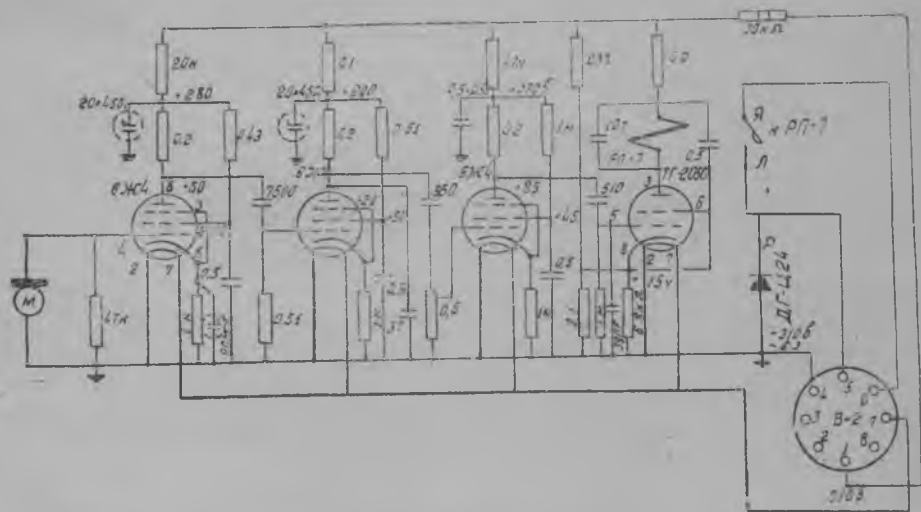


Рис. 3. Схема электронного усилителя

которой помещается 10 м восковой бумажной ленты. Два пера самописца соединены с якорями электромагнитов и смещены относительно продольной оси. Для ручной отметки температуры на лицевой панели имеется кнопка, нажатием которой на ленту наносится тонкая черта.

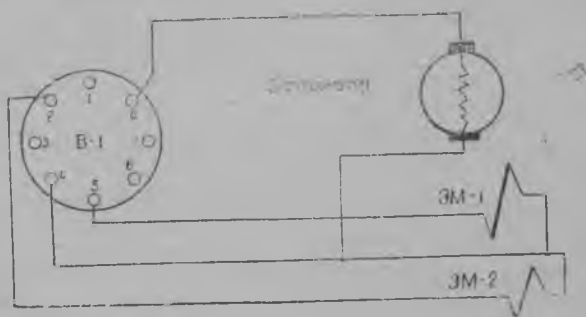


Рис. 4. Схема самописца

Электродвигатель питается от специальной обмотки преобразователя (выпрямителя) напряжением 127 в и вращает приемную кассету со скоростью два оборота в минуту, при этом скорость протягивания ленты равна 1 мм в секунду.

Пропускная способность самописца — 3—4 импульса в секунду. Бумажная лента, на которой производится запись, не требует дальнейшей обработки.

шает 4—5 разрывов в секунду. При большей частоте реле не успевает срабатывать и пишет сплошную горизонтальную линию. Отметка температуры производится через каждые 20°C нажатием кнопки на лицевой панели.

Нагревание термопечи необходимо производить равномерно не более чем на 20° в минуту.

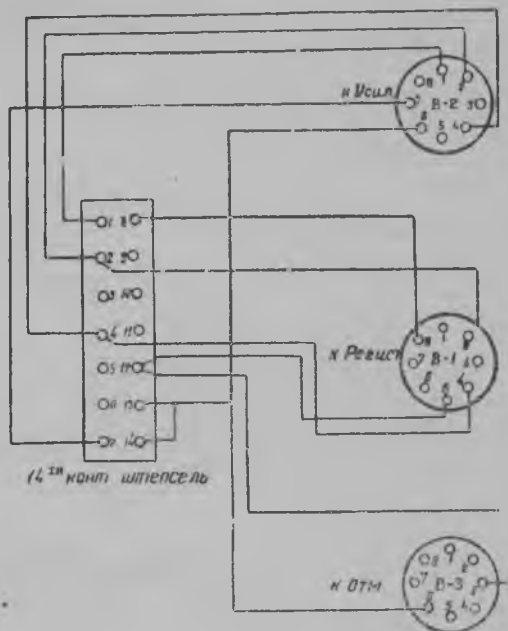


Рис. 6. Схема соединения узлов термовзвукорегистратора

Результаты работы упрощенного термовзвукорегистратора с электромагнитным самописцем (сплошные линии на кривых рис. 7 и 8) проверялись посредством параллельных замеров температуры разрывов включений в минералах с записью на шлейфном осциллографе (пунктирные линии на кривых) и путем визуальных замеров температуры гомогенизации жидких включений в микротермокамере.

Замеры производились на образцах кварца из хрусталеносных пегматитов и кварцевых жил, где особенно хорошо выражена последовательность и спад температуры кристаллизации различных его генераций, а также на образцах флюорита, кальцита и других минералов.

Замеры температур разрывов включений, записанные на восковой бумаге электромагнитным самописцем (сплошные линии кривых), и сопоставление с записями на фотопленке шлейфным осциллографом высокого класса (пунктирные кривые) показаны, как пример, на рис. 7 и 8.

Кривые 1 и 2 отражают температуры разрывов раннего «сотового» кварца из волинских пегматитов, содержащих массу вторичных включений, где, помимо жидкости, находится относительно очень большой объем газовой фазы. Эти включения гомогенизируются при $320\text{—}350^{\circ}\text{C}$. Разрывами отчетливо подтверждается высокая температура залечивания трещин, образовавшихся при $\alpha\text{--}\beta$ -превращении кварца. Кривые 1 соответствуют разрывам при нагревании кварца, раздробленного до фрак-

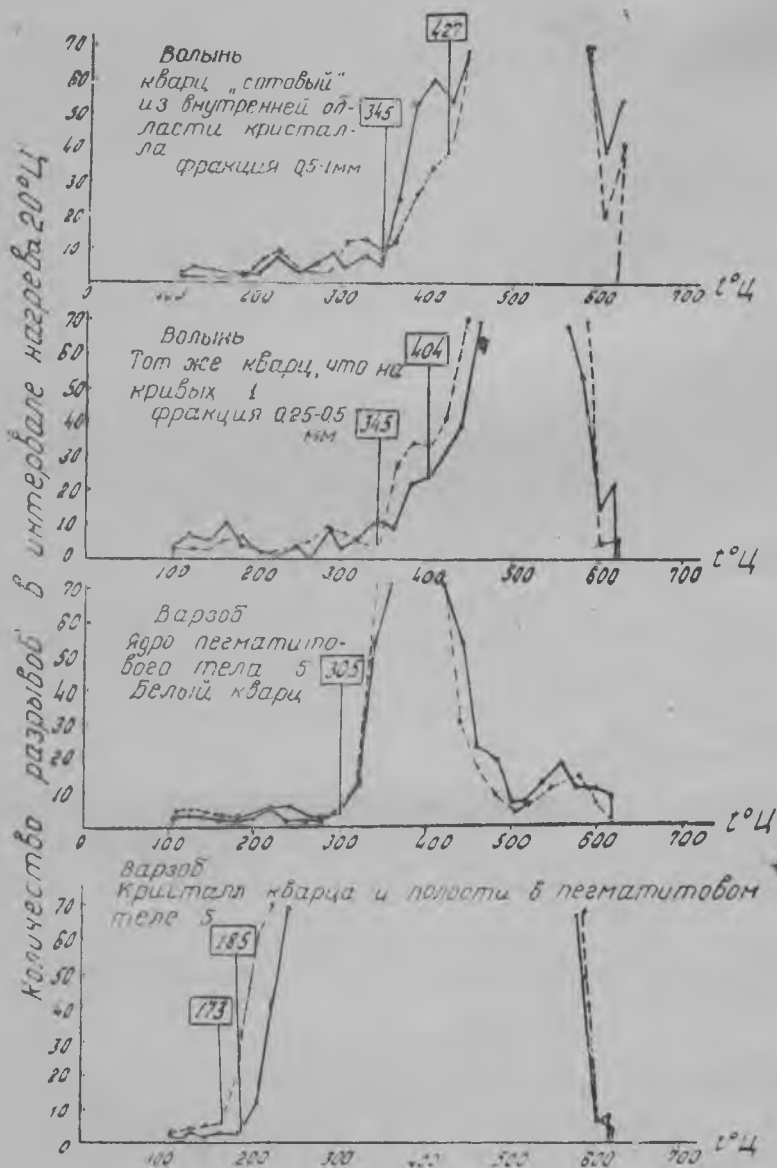


Рис. 7. Кривые температур разрывов жидких включений на электромагнитном самописце (сплошная черта) и шлейфом осциллографе (пунктир)

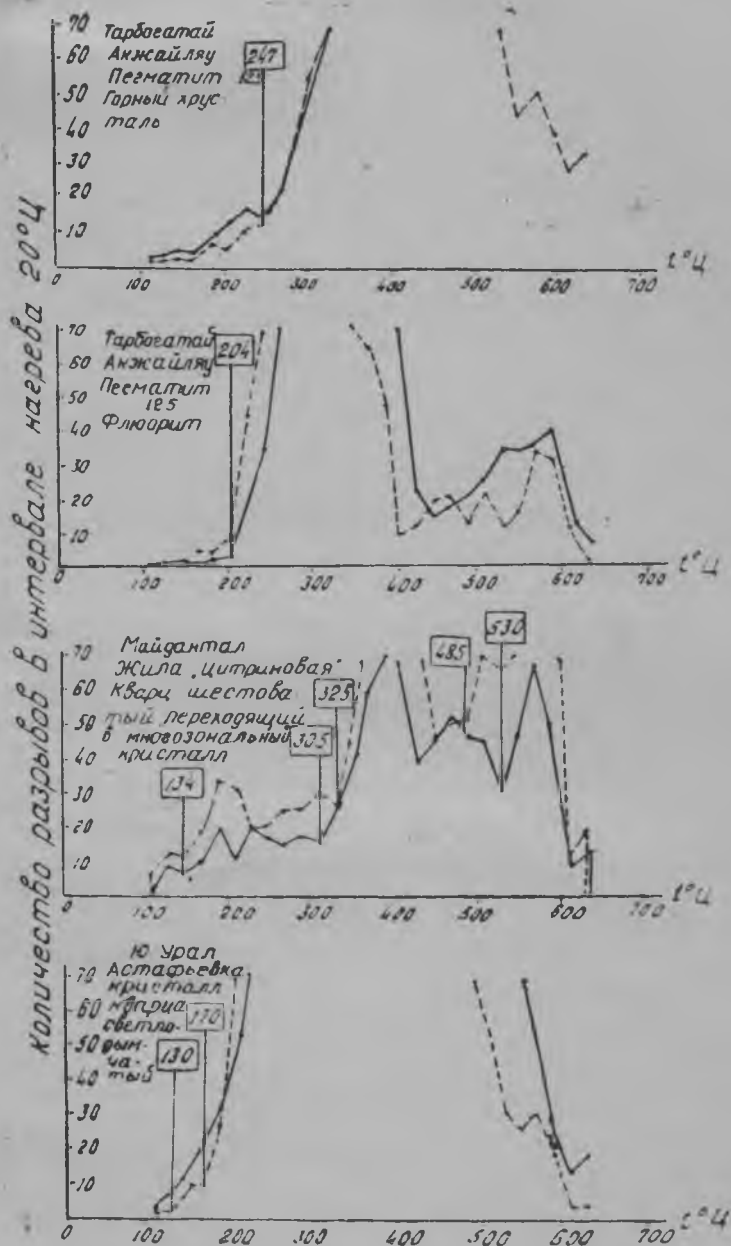


Рис. 8. Кривые температур разрывов жидких включений на электромагнитном самописце (сплошная черта) и шлейфном осциллографе (пунктир)

ции 0,5—1,00 мм, а кривые 2 — кварца, раздробленного до фракции 0,25—0,5 мм. Более плавные и отчетливые результаты дает фракция в 0,25—0,5 мм (также сравнительные замеры производились на многих образцах). Остальные опыты производились при дроблении образцов до фракции 0,25—0,5 мм, дающей лучшие результаты.

Кривые 3 и 4 показывают результаты термометрических замеров кварца из варзобских пегматитов (Памир); кривые 3 — температуру разрывов включений в наиболее раннем «сотомом» белом кварце из ядра пегматитов, а кривые 4 — более поздних кристаллов светло-дымчатого кварца из тех же пегматитовых тел. Здесь особенно отчетливо подтверждается температурная последовательность отложения различных кварцев. Результаты замеров на обоих приборах почти идентичны.

Кривые 5 отображают температуру разрыва жидких включений в поздних генерациях горного хрусталя из пегматитового тела в Тарбагатае, а кривые 6 — почти бесцветного флюорита из того же пегматитового тела. Подтверждается последовательность отложения позднего кварца и флюорита, причем показания обоих приборов очень точно совпали. Измеренная для контроля температура гомогенизации жидких включений в образце 5 была равна 180—190°, а в образце 6 — 160—180°.

Кривые 7 представляют результат замера температур разрывов включений в многозональном кристалле из полевошпатово-кварцевых высокотемпературных жил Майдантала. Это наиболее сложный случай, однако оба прибора отметили температуру многих стадий разрывов жидких включений и многих стадий роста кристаллов кварца во вполне сопоставимых величинах.

На последних кривых 8 показана температура разрывов жидких включений в светло-дымчатом кристалле кварца из полости богатой горным хрусталем жилы 11 на Южном Урале. Кривые, записанные обоими приборами, показали сравнительно низкую температуру и плавное ее падение почти без пульсации. Температура гомогенизации этих же включений тоже является низкой.

На приведенных кривых видно, что результаты записи температур разрывов на восковую бумагу электромагнитным самописцем при соответствующем оснащении прибора повторяют результаты записи шлейфного осциллографа на фотопленку, причем точность и возможность обоих приборов равноценны. Полученные кривые подтверждают принципиальную возможность измерения температур минералообразования методом разрывов. Надо полагать, что предлагаемая нами более простая и дешевая схема автоматического термозвукорегистратора будет способствовать широкому распространению этого метода исследования минералов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д э л г о в Ю. А. и Р а й х е р Л. Д. Автоматический термозвукорегистратор (для минералогических исследований).—Минералог. сб. Львовск. геол. об-ва, 1953, № 7.
2. Е р м а к о в Н. П. Исследования минералообразующих растворов. Изд. Харьковск. ун-та, 1950.
3. Е р м а к о в Н. П. Метод растрескивания в минералогических термометрии.—Минералог. сб. Львовск. геол. об-ва, 1950, № 4.
4. P e a c h P. A. A decrepitation geothermometer.—Am. Min. 1949, vol. 34, No 5—6.
5. S c o t t H. S. The decrepitation method applied to minerals with fluid inclusions.—Econ. Geol., 1948, vol. 43, No 8.

В. А. КАЛЮЖНЫЙ

УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ МИКРОТЕРМОКАМЕРА ДЛЯ АНАЛИЗА ЖИДКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ

Нагревательные приборы для наблюдения под микроскопом процессов фазовых изменений внутри жидких включений за прошедшие сто лет со времени Сорби (3, 4) претерпели значительную эволюцию. Принципиальной стороной конструкции таких приборов является способ передачи тепла от источника к препарату. Обычно нагревание препарата с включениями производится от жидкой, воздушной или твердой среды. При этом выбор среды для обогрева препарата и устройство самого нагревательного прибора должны удовлетворять таким требованиям: а) соответствие действительной температуры включения и температуры, регистрируемой по измерительному прибору (термометру или милливольтметру); б) доступность наблюдения с большим увеличением; в) возможность достижения достаточно высокой температуры (до 500—600°). Удовлетворение таких требований невозможно без соблюдения равномерности обогрева препарата при постепенном повышении (или понижении) температуры. Отсюда важным моментом является хорошая теплоизоляция прибора.

Нагревание препаратов в жидкой среде с соответствующими предосторожностями дает наиболее точные результаты. Однако достижение высоких температур здесь ограничено свойствами употребляемых жидкостей. Максимальные температуры обычно не могут превысить 250—300°.

Широко распространенные в настоящее время микротермокамеры с воздушным обогревом имеют ряд преимуществ перед другими. К основным из них следует отнести простоту устройства при возможности достижения температур до 700°, хорошую видимость объектов, возможность быстрой смены препаратов и нахождения новых объектов даже в процессе нагревания. Однако трудности в соблюдении равномерности обогрева образца и хорошей теплоизоляции приводят к систематическим неточностям в измерениях температур. Последнее послужило поводом для изменения прежней конструкции термокамеры (2). Принцип обогрева в усовершенствованной камере основан на передаче тепла от пластин хорошо теплопроводящего металла препарату, зажатому между этими пластинами.

На рис. 1 видно, что корпус 21, подводка электротока 22 и нагревательное сопротивление 8 аналогичны соответствующим частям микротермокамеры Н. П. Ермакова, но изменена внутренняя цилиндрическая часть камеры. Она состоит из цельнометаллического (стального, алюминиевого или латунного) цилиндра, внутренняя поверхность которого име-

ет нарезку и тонкое упорное кольцо 1. Две металлические пробки 2 свободно заворачиваются со стороны нижней и верхней частей цилиндра. Последние в центре имеют отверстия для освещения объекта 3 и наблюдения за ним под микроскопом 4.

В каждой пробке высверлено по два углубления 5 для гаечного ключа. Для ввода термопары, находящейся в двухканальной фарфоровой трубке 6, в цилиндрической части имеется отверстие 7, диаметр которого отвечает толщине фарфорового изолятора.

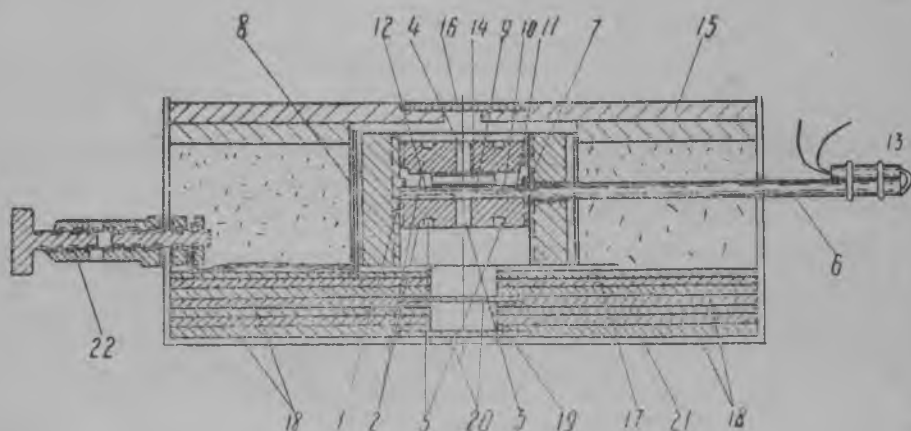


Рис. 1. Усовершенствованная микротермокамера с контактным обогревом препарата

После намотки нагревательного сопротивления 8 и укрепления металлического цилиндра производится монтирование внутренней части термокамеры. Спай термопары 9, раскатанный или сточенный напильником до толщины 0,2—0,05 мм, вводится через боковые отверстия в корпусе и цилиндрической части и прижимается нижней пробкой к предварительно вставленному стеклянному кругу 10. Для изоляции между спаем термопары, расположенным у самого края отверстия, и нижней пробкой вставляется тонкий слюдяной круг 11. В центре последнего для лучшей видимости вырезается отверстие с диаметром, равным диаметру отверстия в пробке. Если спай термопары недостаточно тонкий, то при неосторожном заворачивании нижней пробки можно расколоть стеклянный круг 10. Чтобы избежать этого, между стеклом и пробкой вкладывается слюдяная прокладка 12 с соответствующими вырезами. Толщина ее должна быть равна толщине спаия термопары.

Положение зажато таким образом спаия термопары будет сохраняться при всех последующих измерениях температур и не зависит от перемены препаратов в верхней части рабочего пространства камеры. Чтобы скручивающие усилия, возникающие при перемещении термокамеры, не передавались от наружных выводов термопары к внутренней тонкой ее части, свободные концы термопары следует протянуть через короткий отрезок фарфоровой трубки 13; последняя закрепляется на изоляторе 6. Исследуемый препарат 4 с помощью пинцета помещается на стеклянный круг 10 и слегка прижимается верхней пробкой. После этого термометрические исследования производятся в обычном порядке.

Крышка корпуса термокамеры 15 изготовлена из асбестового картона. Предварительно асбест был смазан силикатным клеем и разогрева-

нием термокамеры прокален вместе с уложенным в углубление стеклянным кругом 10. После такой обработки асбестовая крышка довольно плотно входит в верхнюю часть корпуса и не дает пыли и волокон, мешающих наблюдению. Асбестовая изоляция, как и в обычных микротермокамерах, создает благоприятные условия для более равномерного нагревания внутренней части камеры, однако она у нас рассчитана на применение длиннофокусных объективов. При пользовании обычными объективами следует уменьшить до 6—7 мм высоту той части камеры, которая находится над упорным кольцом 1, а асбестовый круг 15 изготовить из более тонкого картона. Для теплоизоляции в нижней части термокамеры под металлическим цилиндром находится слюдяная пластинка 17, ниже которой положены слои асбестового картона 18 с центральным отверстием 19, закрываемым двумя стеклянными пластинками 20. Чтобы предохранить объектив от нагревания и преждевременного износа, необходимо применять водяные или воздушные охлаждающие устройства (1). Хорошие результаты показал специально изготовленный нами латунный холодильник. Он представляет собой двустворчатую латунную обойму, закрепляемую на объективе, через сквозные отверстия в которой циркулирует вода.

Для удобства снятия асбестовой крышки на ней имеется специальная ручка с теплоизоляцией. Крышка снимается каждый раз, когда надо отвинтить верхнюю пробку и сменить препарат.

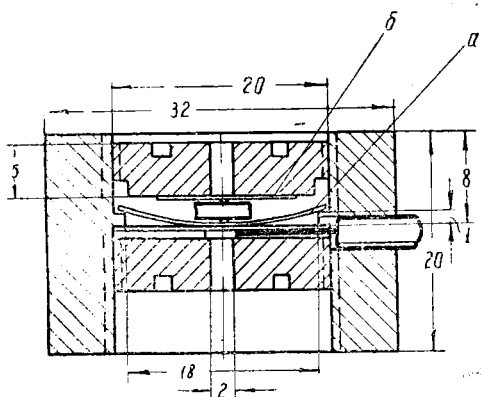


Рис. 2. Внутренняя цилиндрическая часть микротермокамеры и схема закрепления препарата при градуировании термпары. Размеры даны в мм

Градуирование милливольтметра производилось по точкам плавления олова, свинца и цинка. Для этого из тонкого упругого листочка слюды вырезалась, как показано на рис. 2, прямоугольная пластинка *a* размером 18×5 мм, короткие стороны которой округлялись по диаметру пробки. Она вкладывалась в рабочее пространство камеры, упираясь в выступы кольца 1 (рис. 1). Металл, например свинец, нарезался в виде тонких мелких стружек. Одна или две таких стружки помещались в центре слюдяной пластинки, напротив отверстия в нижней пробке. Сверху помещалась небольшая пластинка 14 из кварца или стекла, толщиной 2—2,5 мм. На нее, также против отверстия в пробке, помещались еще одна или две мелкие стружки металла. Эти последние прикрывались тонким листочком слюды *б* (рис. 2) и прижимались верхней пробкой.

Таким образом, металл, по которому производилась градуировка, был зажат верхней пробкой, а пластинка слюды *б* поддерживала упругие усилия даже в момент ослабления зажима при плавлении. В момент достижения температуры плавления стружка металла почти мгновенно меняла свою форму и растекалась (наблюдения производились под микроскопом). По милливольтметру в этот момент отмечалась точка, соответствующая температуре плавления металла. Зерна металла, помещенные на верхней плоскости кварцевой пластинки, обычно плавилась на $1-2^\circ$ ниже температуры плавления стружек, расположенных под пластинкой. Следовательно, ошибка в измерении температуры за счет глубины расположения включений в пластинке не может превышать $1-2^\circ$.

Примененный способ градуировки при постоянном расположении спая термпары исключает случайные ошибки и несоответствие температур под стеклянным кругом *10* и над ним (рис. 1). Общая ошибка измерений температур таким способом, по-видимому, не должна превышать $\pm 2^\circ$ (не учитывая погрешностей в показаниях милливольтметра).

Для контроля нами были произведены измерения температур гомогенизации одних и тех же включений в жидкой среде (применялось масло, температура которого измерялась с помощью термометра) и в термокамере новой конструкции. Расхождение результатов при этом не было больше $2-3^\circ$.

С целью установления ошибок измерений температур гомогенизации включений в термокамерах прежней конструкции (с воздушным обогревом) были взяты препараты и включения в них исследований 1951—1956 гг. а также соответствующие им записи в лабораторных журналах. Производилось сравнение данных наиболее достоверных анализов прошлых лет и полученных в нашей термокамере. Сравнивались также результаты измерений температур гомогенизации одних и тех же включений в новой термокамере и в термокамерах старой конструкции, использовавшихся в лабораториях Львовского университета. Таким образом были сопоставлены результаты примерно 60 анализов.

Произведенные исследования позволяют сделать такие выводы:

1. Температуры гомогенизации, получаемые при нагревании препаратов в обычных термокамерах с воздушным обогревом, всегда занижены.

2. Систематические ошибки измерений температур гомогенизации в термокамерах с воздушным обогревом объясняются следующими причинами. Воздушное пространство над препаратом плохо изолировано от внешнего более холодного воздуха вследствие наличия целого ряда неплотно закрывающихся отверстий в крышке термокамеры. Проникая через щели, более холодный воздух понижает температуру спая термпары. Последний к тому же имеет почти всегда значительные размеры, а прикасается к препарату только небольшой частью своей поверхности. Нагревание препарата происходит и от окружающего воздуха, от слюды (или стекла) среднего оконца. Ошибки тем больше, чем больше поверхность спая термпары, не соприкасающаяся с препаратом, чем выше поднят препаратодержатель к верхнему оконцу и чем выше температура нагрева образца.

3. В среднем ошибки измерений в сторону занижения находятся в пределах $30-40^\circ$. Если для измерений применять хромель-копелевую или хромель-алюмелевую термпару, горячий спай которой слегка уплощен и имеет размеры 2×1.8 мм при высоте 1,2 мм, то температуры гомогенизации, измеренные в обычной воздушной термокамере, будут ниже действительных на $20-30^\circ$, если температура препарата равна $100-200^\circ$,

на 40°, если температура препарата находится в пределах 200—300°, и на 50—60°, если препарат нагрет до 300—400°.

Полученные поправки, для приближения к истинным температурам, с некоторыми предосторожностями следует вводить в результаты прежних термометрических измерений, производившихся в микротермокамерах с воздушным обогревом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анникин И. Н. Применение микроскопа для изучения высокотемпературных процессов.— Завод. лаборатория, 1956, № 7.
 2. Ермаков Н. П. Исследования минералообразующих растворов. Изд. Харьковск. ун-та, 1950.
 3. Sorby H. C. On some peculiarities in the microscopical structure of crystals, applicable to the determination of the aqueous or igneous origin of minerals and rocks.—Phil. Mag., ser. 4, 1857, № 15.
 4. Sorby H. C. On the microscopical structure of crystals, indicating the origin of minerals and rocks.—Journ. Geol. Soc. (London), 1858, vol. 14, Pt. 1.
-

С. Н. ВЕНЕДИКТОВ

ТЕРМОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖИЛЬНОГО КВАРЦА И КРИСТАЛЛОВ ГОРНОГО ХРУСТАЛЯ ИЗ КВАРЦЕВЫХ ЖИЛ ДЖЕЗКАЗГАН-УЛУТАУСКОГО РАЙОНА

При изучении многочисленных безрудных мономинеральных кварцевых жил Джезказган-Улутауского района, отличающихся друг от друга возрастом, условиями залегания, структурой жильного кварца, степенью хрусталеносности и рядом других особенностей, нами было выполнено значительное количество термометрических замеров. Те выводы, которые можно сделать из полученных данных, заставляют нас кратко остановиться на результатах наших исследований.

Термометрические исследования проводились двумя методами: 1) гомогенизации газовой-жидких включений и 2) разрывов (растрескивания) включений. Первый метод применялся при исследовании кристаллов, а также шестоватого и друзового полупрозрачного кварца; вторым методом исследовался молочно-белый жильный кварц, в котором, ввиду слишком малой величины включений, невозможны визуальные наблюдения за гомогенизацией.

Методика исследования основана на наблюдениях гомогенизации включений в тонких приполированных пластинках из кристаллов горного хрусталя при их постепенном нагревании в термокамере; эта термокамера установлена на столике бинокулярной лупы или микроскопа. Она подробно рассмотрена в работах Н. П. Ермакова (2), А. И. Захарченко (3) и ряда других исследователей, и здесь нет необходимости останавливаться на ее описании. Термометрические исследования методом разрывов осуществлялись в Лаборатории исследования неметаллического сырья Всесоюзного геологического института (ВСЕГЕИ). Большую помощь автору в этом деле оказал Н. С. Лазаревич.

До последнего времени регистрация разрывов включений при нагревании измельченного до определенной фракции жильного кварца улавливалась на слух (акустический способ, впервые разработанный Г. Скоттом). Н. П. Ермаковым был предложен оптический способ фиксации результатов, основанный на наблюдении над зернами минералов в термокамере, которые при взрывании в них включений перемещаются или вздрагивают. Н. П. Ермаков, подробно описывающий в своей работе метод растрескивания, правильно отмечает, что «субъективность в оценке температур, определяющихся этим методом, по сравнению с другими методами, еще недопустимо велика» (2). Существенный недостаток метода растрескивания заключается и в том, что он является «слепым», так как не позволяет вести наблюдения над ходом гомогенизации включений.

Эти два момента и служили главной причиной ограниченного использования метода растрескивания для термометрических исследований. Усовершенствование методики и применение саморегистрирующих устройств для записи разрывов включений позволяют надеяться, что и этот метод найдет широкое применение в определении температур минералообразующих растворов. Положительные результаты в этом направлении получены Ю. А. Долговым и Л. Д. Райхер, которые проводили свои исследования на приборе с автоматической записью хода разрывов включений (1).

Мы использовали также упрощенный саморегистрирующий прибор, сконструированный во ВСЕГЕИ А. И. Захарченко, Н. С. Лазаревичем и Г. И. Москалюк¹.

Исследования проводились преимущественно на образцах, измельченных до фракции 0,5 мм. При более мелком измельчении возникает опасность уничтожения многих сравнительно крупных включений. Контрольные опыты с фракциями 1 мм и кусочками кварца в 2—4 мм в диаметре показали, что в этом случае начало массового разрыва включений происходит при такой же температуре, какая была при нагревании фракции 0,5 мм, с той лишь разницей, что интервал температуры массового разрыва включений получался более растянутым. Это легко объяснить тем, что глубоко залегающие включения, в силу значительного сопротивления, разрушают стенки включения только при значительном перегреве выше температуры гомогенизации. Продолжительность каждого опыта составляла 15—20 мин., т. е. за это время происходило нагревание образца от 20—40 до 600°. Для того чтобы образец успевал равномерно прогреваться, навеска бралась не более 2—2,5 г. Удлинение продолжительности нагрева до 30—50 мин. не показывало изменения температуры начала массового разрыва включений по сравнению с более быстрым нагревом.

На проявленной киноплёнке разрывы включений фиксировались штрихами, количество которых отражало их интенсивность. Киноплёнка, с отмеченными на ней интервалами температур в 100 и 20°, градуировалась на интервал 5°, и на столике фотоувеличителя производился подсчет количества разрывов в интервале температур 5°, что и являлось исходными данными для построения графиков хода разрывов при нагревании (на оси абсцисс откладывалась температура, а на оси ординат — количество разрывов). Фиксация начала массового разрыва включений не составляла труда, хотя количество разрывов в интервале температур 5° в различных образцах сильно варьировало и в большинстве образцов при максимальном растрескивании было так велико, что подсчитать отдельные разрывы не представлялось возможным. Начало волны массового разрыва включений обычно соответствовало 20—30 или 30—40 разрывам в интервале температур 5°.

Методом разрывов включений нами исследовано около 50 образцов кварца из различных жил, отличающихся как по возрасту, так и по структуре кристаллов. Как показали исследования Е. Ингерсона, А. И. Островского, Г. Кеннеди, для низкотемпературных включений (до 150°) температура гомогенизации очень близка к истинной температуре минералообразования; вместе с тем для высокотемпературных включений, обычно содержащих большие количества растворенных минеральных веществ, для определения температур минералообразования необходимы значительные поправки; эти поправки должны быть направлены в сторону повышения за счет концентрации растворов и высоких давлений, существовавших во время образования включений.

¹ Прибор описывается в данном сборнике на стр. 35—37. Редакция.

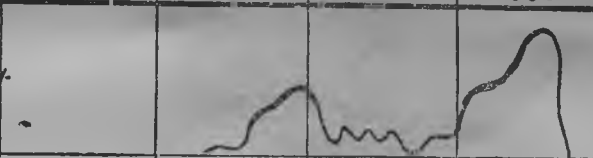
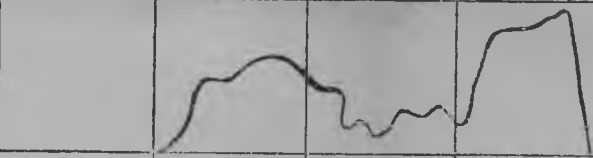
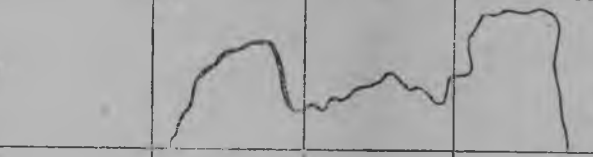
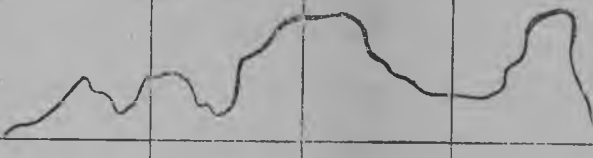
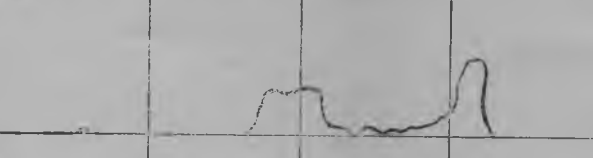
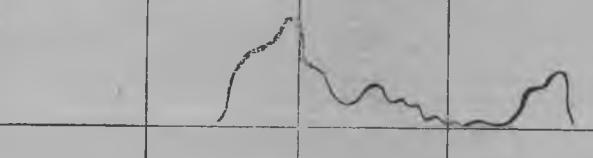
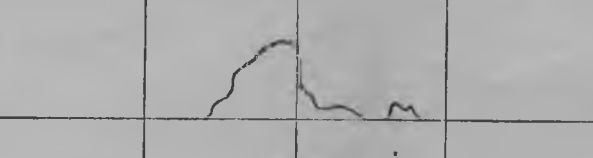
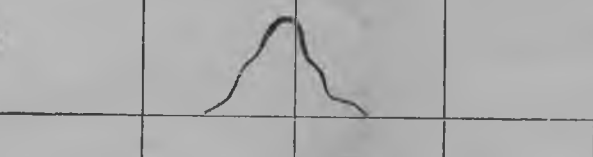
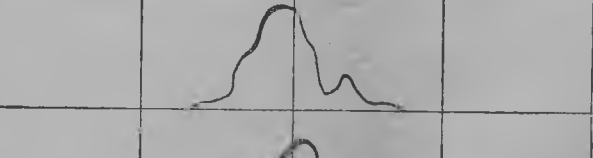
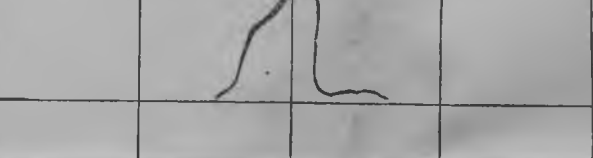
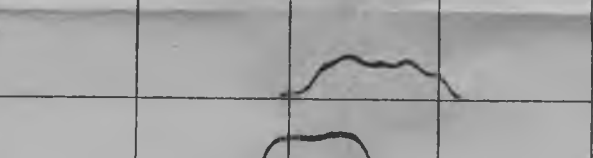

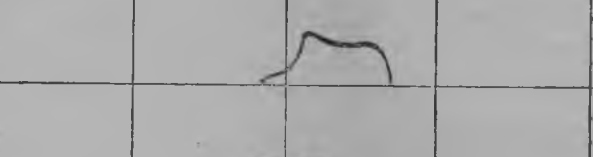
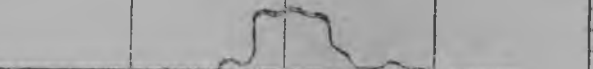
№	№ обр.	Возраст жил	место залегания и вмещающие породы	характер жильного кварца	Температура				Кривая разрыва	Средняя температура включения
					300	400	500	600		
1	89	Докембри-ский	Восточный склон Кыштау, кристаллические сланцы Ст	Сливной метаморфизованный						>40 30-40 20-30 10-20 0-10 370 522
2	10 ^с	Докембри-ский	Актаста-булак, кристаллические сланцы Ст	Сливной метаморфизованный						>40 30-40 20-30 10-20 0-10 345 520
3	96 ^с	Докембри-ский	р. Белеуты, гнейсы, кристаллические сланцы Ст	Сливной метаморфизованный						>40 30-40 20-30 10-20 0-10 340 525
4	70	Каледон-ский	Район м-ния Нурманй, сланцы Рз	Массивный, зернистый, метаморфизованный						>40 30-40 20-30 10-20 0-10 370 550
5	74 ^с	Каледон-ский	р. Жидели-Узень, песчаники	Массивный, зернистый, метаморфизованный						>40 30-40 20-30 10-20 0-10 380 510
6	137 ^с	Каледон-ский	р. Байкунур, сланцы Рз	Массивный, мелко-зернистый						>40 30-40 20-30 10-20 0-10 365 565
7	7	Варис-ский	М-ние Тамды, песчаники, аргиллиты Дз	Крупно-зернистый						>40 30-40 20-30 10-20 0-10 360
8	1	Варис-ский	М-ние Жаман-Котр, песчаники, аргиллиты Дз	Крупно-зернистый						>40 30-40 20-30 10-20 0-10 365
9	175 ^с	Варис-ский	Хр Кыштау, конгломераты Дз	Крупно-зернистый						>40 30-40 20-30 10-20 0-10 372
10	1167	Варис-ский	М-ние Котр, аргиллиты Дз	Крупно-зернистый, шестобатый						>40 30-40 20-30 10-20 0-10 377
11	1148 ^с	Варис-ский	М-ние Актаст, Жила №3, гранодиориты	Мелко-зернистый, метаморфизованный						>40 30-40 20-30 10-20 0-10 420
12	13	Варис-ский	М-ние Актаст, Жила №3, гранодиориты	Крупно-зернистый						>40 30-40 20-30 10-20 0-10 360
13	78	Варис-ский	М-ние Актаст, Жила №6, гранодиориты	Массивный, мелкозернистый						>40 30-40 20-30 10-20 0-10 410
14	78 ^с	Варис-ский	М-ние Актаст, Жила №6, гранодиориты	Крупно-зернистый, шестобатый, перекристаллизированный						>40 30-40 20-30 10-20 0-10 380

Рис. Кривые разрывов включений в жильном кварце

В изученных нами образцах жильного кварца обычно присутствовали включения, разрыв которых наступал при температуре свыше 300° , а иногда и 400° . Невозможность в большинстве случаев ввести обоснованные поправки к наблюдаемым температурам начала массового разрыва включений, соответствующие в первом приближении минимальным температурам минералообразования, несколько не умаляют значения этого метода исследования. Кроме знания истинных температур минералообразования, не меньшее значение имеет и установление температур относительных, что позволяет отличать одни жилы от других или градуировать отдельные этапы в сложном процессе формирования жил. С этой точки зрения полученные нами результаты вполне удовлетворительны.

Наиболее высокие температуры начала массового разрыва включений получены для согласных нехрусталеносных жил, залегающих в кристаллических сланцах и гнейсах докембрия и сложенных массивным метаморфизованным или сливным кварцем. По всем данным, эти жилы наиболее древние, докембрийский возраст которых подтверждается наличием многочисленной гальки метаморфизованного жильного кварца в конгломератах, залегающих в основании кембрийских отложений, а также пересечением их хрусталеносными варисскими жилами.

Из шести проанализированных образцов метаморфизованного кварца в пяти случаях фиксировался очень резкий максимум разрывов включений при $520\text{--}550^{\circ}$ (рис.). Только в одном образце максимум разрывов при температуре 522° проявлен относительно слабо. Для четырех образцов зафиксирован второй, совершенно отчетливый максимум разрывов, начинающийся в интервале $340\text{--}370^{\circ}$ и совпадающий с массовым разрывом включений в варисских жилах. По полевым наблюдениям над кварцевыми жилами, происходило наложение на древние жилы последующей, вероятной варисской, минерализации, с которой связано даже появление кристаллов горного хрусталя в древних жилах сливного кварца. Данные полевых наблюдений в этом случае полностью подтверждаются результатами термометрических исследований. По максимуму разрывов при $520\text{--}550^{\circ}$ докембрийские жилы легко отличаются от варисских, где в этом интервале температур разрывы включений полностью отсутствуют.

Термометрические исследования образцов метаморфизованного жильного кварца из согласных смятых жил в нижнепалеозойских породах показывают, что по температуре начала массового разрыва включений эти жилы, с одной стороны, очень близки к докембрийским жилам, а с другой, — к варисским. Так, из восьми исследованных образцов в трех отмечались два максимума разрывов: нижний при $365\text{--}370^{\circ}$ и верхний при $510\text{--}570^{\circ}$. По характеру кривых хода разрывов эти жилы полностью идентичны древним докембрийским жилам с наложенной варисской минерализацией. У четырех образцов имеется только один максимум разрывов, начинающийся в интервале $365\text{--}397^{\circ}$. Эта температура соответствует началу массового разрыва включений в варисских жилах.

Исключительно однообразная картина хода разрывов включений наблюдалась при анализе 14 образцов из варисских жил, сложенных массивным зернистым и скелетно-шестоватым кварцем. У всех анализированных образцов отмечался только один максимум разрывов, начинающийся при $360\text{--}380^{\circ}$. Показательно, что интервал температуры, в продолжение которого происходило интенсивное взрывание включений, сравнительно короткий: в большинстве исследованных образцов при $400\text{--}425^{\circ}$ число разрывов резко уменьшилось или они полностью прекраща-

лись. Этим анализированные образцы варисских жил также достаточно резко отличались от проб из докембрийских и нижнепалеозойских жил, в которых обычно фиксировались растянутые интервалы температур массового разрыва включений.

Исследованные 14 образцов взяты из жил, которые расположены на разных расстояниях от интрузивных массивов. Так, кварцевые жилы месторождений Тамды, Жаман-Котр, Нурман находятся на значительном удалении от интрузий (15—25 км), а месторождения Котр, Карабайтам расположены в непосредственной близости от них. Проанализированы также образцы из жил, залегающих непосредственно в аляскитовых гранитах и гранодиоритах. Как и следовало ожидать, какой-либо закономерности в смене температур минералообразования для варисских хрусталеносных жил, находящихся на различных расстояниях в позднекаледонских интрузиях, не наблюдается, и это является фактом, подтверждающим отсутствие между ними генетической связи.

Результаты термометрических исследований кварцев зональных жил позволяют наметить отдельные этапы формирования, устанавливаемые по соотношению его различных генераций.

Наиболее типичными примерами зональных жил являются кварцевые жилы месторождений Актас I, Актас II и Северный Байконур, залегающие в гранодиоритах. В них всегда удается наблюдать массивный мелкозернистый метаморфизованный кварц, который по взаимоотношению с другими разновидностями жильного кварца является наиболее ранним. Для этого кварца как раз и характерны наиболее высокие температуры начала массового разрыва включений, лежащие в интервале 410—438°. В результате поступления следующей порции гидротермальных растворов по вновь развивающейся системе трещин этот жильный кварц часто подвергается полной перекристаллизации, и за счет него развивается крупнозернистый кварц, в котором интенсивное взрывание включений наступает при 350—380°, соответствующей температуре разрывов включений в кварце варисских жил.

Третий этап формирования жил, во время которого происходит образование зон шестоватого, друзового кварца и хрустальных гнезд, развивающихся по зонам дробления внутри жил или трещинам повторного открытия в их зальбандах, наступает после резкого падения температуры минералообразующих растворов. Так, в жиле 3 месторождения Актас II гомогенизация первичных включений в шестоватом прозрачном кварце наступает при 125—135° (шесть замеров), а в основании кристаллов из друз — при 120—122° (восемь замеров). В хрусталеносных жилах месторождений Актас I и Северный Байконур температуры гомогенизации включений из основания кристаллов в гнездах соответственно равны 160—164° и 158—161° (шесть замеров).

Термометрическим исследованиям методом гомогенизации было подвергнуто около 50 кристаллов горного хрусталя из варисских жил. Кроме того, визуальными наблюдениями под микроскопом просмотрено более 150 приполированных пластинок и «выколков» из кристаллов. Все без исключения исследованные образцы содержат низкотемпературные жидкие включения, в которых объем газовой фазы составляет 5—15%. Ни в одном из исследованных кристаллов во включениях не зафиксированы твердые фазы, которые характерны для высокотемпературных включений с большой концентрацией минеральных солей в растворе.

Температура гомогенизации включений в кристаллах из варисских жил, залегающих в самых различных породах и в разном удалении от позднекаледонских интрузий, вплоть до жил, залегающих непосредствен-

но в интрузивах, очень однообразна и составляет для первичных включений 120—140°. Нижняя граница температур гомогенизации жидких первичных и первично-вторичных включений лежит в интервале 120—80° (наружные зоны кристаллов). Во всех кристаллах, для которых такие замеры были сделаны, наблюдается постепенное понижение температуры гомогенизации включений от центральных зон кристаллов к наружным, причем разница в температуре может достигать 20—40°.

ВЫВОДЫ

1. Кварцевые жилы Джекказан-Улутауского района формировались в широком диапазоне температур. Наиболее высокие температуры для жильного кварца зафиксированы в древних жилах, возраст которых по геологическим данным определяется как докембрийский и каледонский. Основная масса кварца таких жил в самом первом приближении кристаллизовалась при температурах выше 500°. При наложении на древние жилы варисской минерализации в них отчетливо фиксируется второй максимум разрывов при 340—380°, совпадающий с температурой кристаллизации жильного кварца варисских жил.

2. Большинство варисских жил сформировалось в интервале 360—400°. При небольшой глубине, на которой образовывались жилы (максимальная мощность осадочных пород верхнего девона и нижнего карбона составляет 2000—2300 м), давление во время жилообразования могло составлять цифру порядка 400—450 атм. По данным Н. И. Хитрова (4), экспериментально изучавшего устойчивость кварца и миграцию кремнезема в гидротермальных условиях, наибольшие изменения в устойчивости кварца в изобарических условиях сосредоточиваются в интервале 300—450°, вплоть до изобары в 500 атм. Как можно видеть, режим кристаллизации варисских жил очень близок к этим условиям.

3. В зональных кварцевых жилах термометрические исследования жильного кварца позволяют четко наметить различные этапы формирования жил. В наиболее типичных зональных жилах, залегающих в гранодиоритах, таких этапов насчитывается три. Из них первые два, отвечающие кристаллизации массивного зернистого кварца, протекали при температуре от 350 до 450°, в то время как шестоватый жильный кварц, оконтуривающий гнезда, и кристаллы горного хрусталя во всех типах варисских хрусталеносных жил формировались при минимальной температуре 120—140°.

4. Сравнивая результаты термометрических исследований жильного кварца и кристаллов горного хрусталя, можно прийти к выводу, что последние кристаллизовались в очень узком интервале температур из низкотемпературных гидротермальных растворов. Отсутствие постепенных переходов в температурах кристаллизации жильного кварца и кристаллов и, наоборот, резкая разница между ними говорят о том, что основная масса горного хрусталя, особенно в промышленных хрусталеносных жилах, образовалась из существенно новой и последней порции гидротермальных растворов, проникших в ранее сформированные жилы по зонам внутривильных нарушений или трещинам повторного раскрытия. Такие слабо нагретые гидротермальные растворы заимствовали большую часть минеральной нагрузки, и в первую очередь кремнезема, из вмещающих пород, роль которых часто выполняет ранее отложенный массивный зернистый кварц. Это подтверждается тем, что около хрустальных гнезд и зон шестоватых кварцев изменения вмещающих пород оказываются очень значительными.

6. Дальнейшее усовершенствование методики термометрических исследований жильных кварцев представляется очень плодотворным, так как уже одно знание относительных температур минералообразования помогает отличать одни жилы от других или намечать в пределах одной жилы отдельные этапы минералообразования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Долгов Ю. А., Райхер Л. Д. Автоматический термозвукорегистратор. — Минералог. сб. Львовск. геол. об-ва, 1949, № 3.
 2. Ермаков Н. П. Исследования минералообразующих растворов. Изд. Харьковск. ун-та, 1950.
 3. Захарченко А. И. Минералообразующие растворы и генезис кварцевых жил. Гостеолтехиздат, 1955.
 4. Хитаров Н. И. Экспериментальная характеристика устойчивости кварца и миграции кремнезема в гидротермальных условиях. — Тр. 4-го съез. по экспетр. и минералог. Изд-во АН СССР, 1953, вып. 2.
-

Е. Я КИЕВЛЕНКО

ОПЫТ ИЗУЧЕНИЯ ЖИДКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ИСЛАНДСКОМ ШПАТЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Среди различных типов месторождений исландского шпата наибольшее внимание привлекают кальцитоносные образования в основных эффузивных и гипабиссальных породах трапповых формаций. Именно к этой генетической группе относятся широко известные месторождения Исландии и Южной Африки, а на территории нашей страны — месторождения Восточной Сибири.

За многолетний период их изучения накоплен большой фактический материал, однако условия образования месторождений и многие вопросы кристаллогенезиса кальцита часто толкуются недостаточно убедительно или даже противоречиво. В частности, до настоящего времени не может считаться полностью выясненной природа минералообразующих растворов, знание которой необходимо для обоснования геологических предположений поисков месторождений и искусственного выращивания исландского шпата. Для практических целей в первую очередь важно определить основные особенности состава растворов и физико-химические параметры среды минералообразования. Правильное решение этих задач едва ли возможно без учета объективных экспериментальных данных, полученных в результате всестороннего исследования жидких включений в кристаллах кальцита.

Следует отметить, что впервые температура гомогенизации жидких включений в исландском шпате некоторых восточносибирских месторождений была определена Н. П. Ермаковым (3) и затем А. В. Скропышевым (5), который, кроме того, предпринял попытку выяснить химический состав включений по водной вытяжке из кристалла кальцита.

Геологическая позиция восточносибирских месторождений исландского шпата определяется их тесной связью с нижнемезозойской трапповой формацией, занимающей центральную и северо-западную части Сибирской платформы (4). Месторождения локализованы в зонах дробления туфов (илимпейский тип), в дифференцированных телах интрузивных траппов (вилюйский тип), в мандельштейнах — миндалекаменных частях базальтовых покровов и в шаровых лавах (нижнетунгусский тип). В минералогическом составе кальцитоносных тел преобладают натриевые и натро-кальциевые цеолиты (натролит, томсонит, гейландит, десмин, морденит и другие), анальцит, халцедон, хлориты, гидрослюда, монтмориллонит, иногда сульфиды (марказит, пирит). Крупные кристаллы кальцита оптического качества образуются, как правило, в последнюю стадию гидротермального процесса в пустотах магматического или тектони-

ческого происхождения. Изменения боковых пород иногда проявлены очень интенсивно и заключаются в анальцимизации и цеолитизации основных плагиоклазов, а также в хлоритизации моноклинного пироксена и вулканического стекла.

Жидкие включения в кристаллах исландского шпата распространены довольно широко и иногда достигают величины $0,5-1 \text{ см}^3$. Большинство включений не превышает в поперечнике $1-2 \text{ мм}$, и их скопления обычно являются причиной замутненности кристаллов.

По морфологии различаются ограненные вакуоли (так называемые отрицательные кристаллы), длинная ось которых часто совпадает с тройной осью симметрии кристалла исландского шпата (рис. 1), округлые и полугогранные полости (рис. 2) и включения причудливой формы (рис. 3). В кальците Джекиндинского месторождения наблюдается скелетный рельеф стенок вакуолей.

Почти все включения при комнатной температуре являются двухфазовыми и содержат газовый пузырек, образовавшийся в результате охлаждения кристалла и уменьшения объема жидкости. Только в одном случае в кристалле Гончакского месторождения было констатировано трехфазовое включение с присутствием, кроме жидкости и газа, кубического кристаллика галита (рис. 4). Полностью жидкие однофазовые включения холодноводных растворов всегда приурочены к залеченным трещинам и должны считаться вторичными.

Объем жидкой фазы обычно составляет от 85 до 98% всего объема вакуоли (при 20°), хотя в ряде случаев отмечаются аномальные соотношения газовой и жидкой фаз. Иногда это происходит за счет «расшнурования» включений с неравновесной формой, но в основном объясняется нарушением их герметичности, чему способствует совершенная спайность кальцита. Большой размер газового пузырька в таком случае, как показал Н. П. Ермаков (3), связан не с сокращением объема охлаждающейся жидкости, а с ее утечкой по трещинам, окружающим нарушенное включение. Обычно все крупные включения являются нарушенными, и газовая фаза занимает до 50% их объема.

Другая специфическая причина аномального увеличения газового пузырька имеет место во включениях, соприкасающихся с иглами мordenита, также находящимися в исландском шпате. По справедливому предположению А. В. Скропышева (5), часть воды из таких включений поглощается цеолитом, что, естественно, приводит к уменьшению объема жидкой фазы.

Имевшиеся в нашем распоряжении многочисленные включения в кристаллах кальцита из месторождений разных типов были подвергнуты термометрическим исследованиям (выполнены Н. И. Андрусенко), а наиболее крупные из них использованы для химического анализа заключенных растворов.

Как известно, принцип термометрического исследования жидких включений основан на предположении о захвате кристаллизующимся минералом частиц гомогенной среды, что, по-видимому, справедливо в подавляющем большинстве случаев. Следовательно, температура гомогенизации двухфазового включения позволяет определить минимально возможную температуру образования соответствующей зоны кристалла-«хозяина». Полученные данные будут наиболее близки к истинной температуре минералообразования при небольшой величине давления и температуры, что, по общегеологическим данным, вполне возможно предполагать для месторождений исландского шпата.

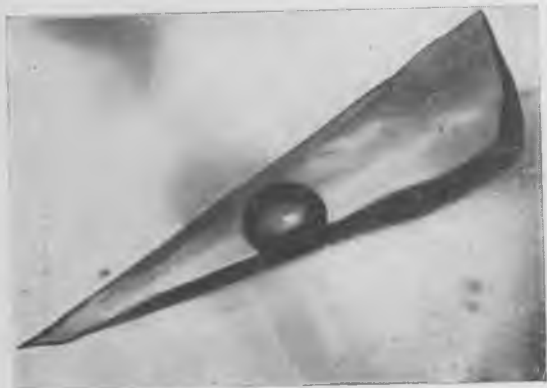


Рис. 1. Ограниченное жидкое включение. Джекиндинское месторождение. Увеличение 80



Рис. 2. Частично ограниченное изометричное жидкое включение. Месторождение Шпат. Увеличение 56



Рис. 3. Булавовидное частично ограниченное включение. Джекиндинское месторождение. Увеличение 56



Рис. 4. Трехфазовое нарушенное включение с кубиком галита. Гончакское месторождение. Увеличение 56

Всего было просмотрено более тысячи кристаллов (спайных выколов) кальцита с жидкими включениями, из которых изготовлено около двухсот пятидесяти препаратов для термометрического исследования. Отбирались первичные и мнимовторичные (по терминологии Н. П. Ермакова) включения с нормальным соотношением газовой и жидкой фаз.

Следует отметить, что диагностика первичных включений в исландском шпате не представляет особых трудностей, так как они обычно находятся в зонах роста или в плоскостях индукционных граней кристаллов (2). Вторичные включения, как правило, расположены вдоль плоскостей спайности или по изогнутым поверхностям раковистых трещин.

Таблица 1

Температуры гомогенизации и коэффициенты заполнения (при 20°) жидких включений в кристаллах исландского шпата

№№ п/п	Название месторож- дения	Тип месторож- дения	Температура гомогени- зации			Коэффициент заполне- ния жидкостью при 20°		
			мини- мальная	макси- мальная	сред- няя	мини- мальный	макси- мальный	сред- ний
1	Янгуракта	илимпейский	43	117	72	0,90	0,97	0,95
2	Куктуле	"	40	42	40	0,97	0,98	0,98
3	Джекинда	вилюйский	94	153	110	0,84	0,93	0,91
4	Мархая	"	94	157	109	0,83	0,93	0,91
5	Гайн	скарновый	92	112	102	0,90	0,93	0,92
6	Шпат	нижнетунгус- ский	51	117	82	0,90	0,97	0,94
7	Гончак	"	50	139	66	0,85	0,97	0,96
8	Джезгли	"	48	119	67	0,90	0,97	0,96

Нагревание препаратов производилось в термокамере системы Н. П. Ермакова (3) с использованием медь-константановой и хромель-копелевой термодпар. Для исследования крупных включений с температурой гомогенизации ниже 100° применялась водяная ванна. Темп нагрева подбирался экспериментально в зависимости от размера включения и толщины препарата и в среднем составлял 10° в четверть часа.

Гомогенизация всех включений происходит в жидкой фазе, за исключением явно нарушенных включений с аномально большим газовым пузырьком, которые обычно взрываются, так и не достигнув гомогенного состояния.

Результаты определения температуры гомогенизации жидких включений показаны в табл. 1. В целом температура является невысокой и колеблется в пределах от 40 до 157°, соответственно заполнению вакуоли жидкостью (при 20°) от 83 до 98%.

Сопоставление статистических кривых, построенных в координатах: температура гомогенизации — число замеров (рис. 5), показывает хорошее совпадение пиков для однотипных месторождений — Янгуракта и Куктуле, 40—45°; Джекинда и Мархая, 105 и 112°; Гончак и Джезгли, 55—60°, — тем самым подтверждая сходство условий их образования. Сравнительно широкий диапазон температур гомогенизации включений каждого месторождения объясняется последовательным понижением температуры растворов в процессе роста кристаллов. Единичные высокие значения температуры, сильно отличающиеся от всех остальных, вероятно, связаны с нарушением герметичности отдельных включений и не должны приниматься во внимание.

Зависимость между температурой гомогенизации и коэффициентом заполнения жидкого включения при 20° отражена на рис. 6. Приведенный график дает возможность определения точки гомогенизации по измеренному при комнатной температуре соотношению газовой и жидкой фаз. Аналогичная кривая для чистой воды будет расположена несколько выше.

Благодаря наличию крупных жидких включений, оказалось возможным произвести индивидуальные химические анализы, определив состав

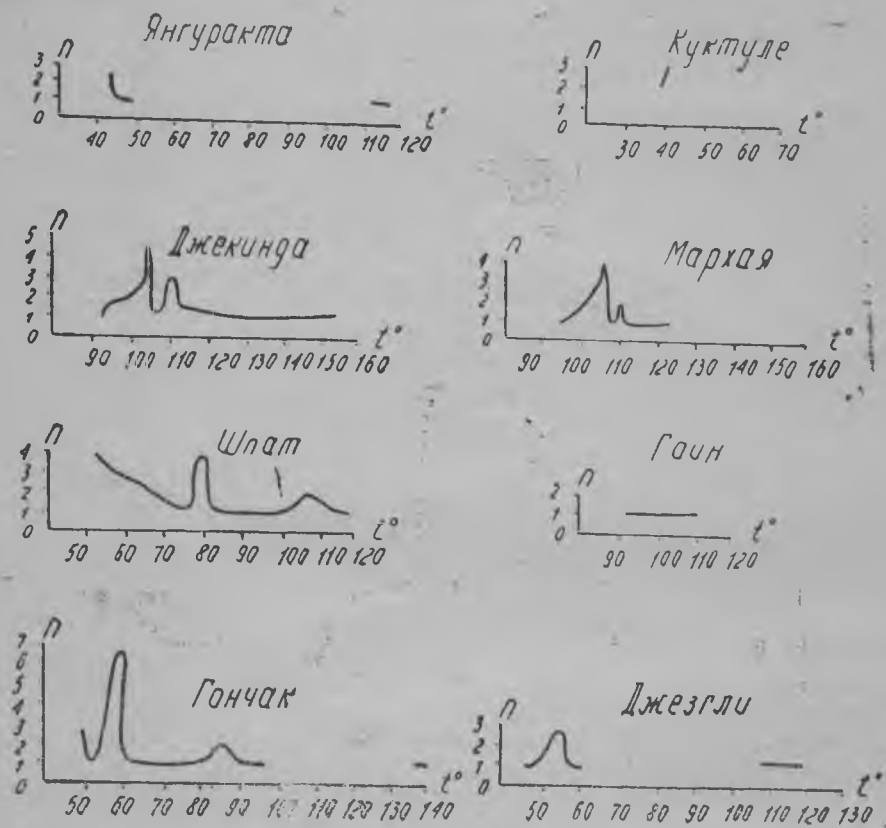


Рис. 5. Статистические кривые гомогенизации жидких включений в кристаллах исландского шпата различных месторождений (t — температура, n — число замеров)

и истинную концентрацию находящегося в них раствора (табл. 2; аналитик Е. В. Ренгартен). Экстрагирование содержимого включений в исландском шпате и микрохимические анализы выполнены под руководством Н. И. Хитарова в Лаборатории магматогенных процессов Института геохимии и аналитической химии АН СССР по методике, рассмотренной в статье Н. И. Хитарова и др. (6). Объем вакуолей определялся по весу воды раствора и непосредственным измерением путем заполнения полости посредством ультрамикропипеток. В расчеты вносилась поправка на растворение кальцита в воде.

Анализами установлено, что во включениях находятся весьма концентрированные (от 47 до 230 г/л) растворы хлоридов кальция и натрия, соотношение между которыми колеблется от 10,4 : 1 до 1,1 : 1. Наименьшая концентрация солей отмечена в жидких включениях в кристаллах

Химический состав жидких включений в кристаллах исландского шпата месторождения Сибирской платформы

Химические компоненты	Гончакское месторождение, обр. 1		Гончакское месторождение, обр. 2		Месторождение Шпат, обр. 30		Нильское месторождение, (уч. 2) обр. 3		Куктулинское месторождение, обр. К-103		Янгуракское месторождение, обр. 82	
	М2	М2-ЭКВ.	М2	М2-ЭКВ.	М2	М2-ЭКВ.	М2	М2-ЭКВ.	М2	М2-ЭКВ.	М2	М2-ЭКВ.
HCO ₃ ⁻	0,19	0,003	не обн.	—	не обн.	—	не обн.	—	не обн.	—	не обн.	—
Cl ⁻	7,36	0,208	9,76	0,275	1,728	0,048	0,345	0,009	0,475	0,013	0,78	0,022
SO ₄ ²⁻	не обн.	—	не обн.	—	не обн.	—	не обн.	—	не обн.	—	не обн.	—
С у м м а		0,211		0,275		0,048		0,009		0,013		0,022
K ⁺	не обн.	—	не обн.	—	не обн.	—	не обн.	—	не обн.	—	не обн.	—
Na ⁺	0,72	0,030	0,52	0,022	0,09	0,004	0,09	0,004	0,046	0,002	0,16	0,007
Mg ²⁺	<0,0005	—	<0,0005	—	<0,0005	—	<0,0005	—	<0,0005	—	<0,0005	—
Ca	3,70	0,185	4,26	0,213	0,94	0,047	0,1	0,005	0,12	0,006	0,30	0,015
С у м м а		0,215		0,235		0,051		0,009		0,008		0,022
Концентрации солей 2/1	136,3	—	230,0	—	158,0	—	74,0	—	47,0	—	72,0	—
Ca (HCO ₃) ₂	0,25	—	—	—	2,60	—	0,28	—	0,33	—	0,83	—
CaCl ₂	9,93	—	11,82	—	0,23	—	0,23	—	0,12	—	0,41	—
NaCl	1,69	—	1,28	—	10,4	—	1,1	—	2,6	—	1,8	—
Ca/Na	6,1	—	8,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Объем вакуоли в мл	0,089	—	0,063	—	0,018	—	0,007	—	0,013	—	0,017	—

Куктулинского и Янгуракского месторождений (илимпейский тип), наибольшая — на месторождении Гончак (нижнетунгусский тип). Примечательно полное отсутствие аниона SO_4^{2-} и незначительное количество HCO_3 , зафиксированное только в одном случае.

Два крупных включения в исландском шпате Гончакского месторождения были использованы для определения рН растворов, измеренного универсальным индикатором и оказавшегося равным 5,0—5,5.

Экспериментально построенная Н. И. Хитаровым и С. Д. Малининым

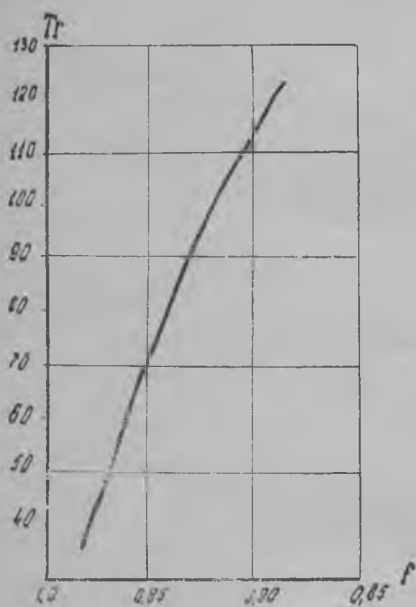


Рис. 6. График зависимости температуры гомогенизации от степени заполнения жидкого включения при 20° в исландском шпате Сибирской платформы

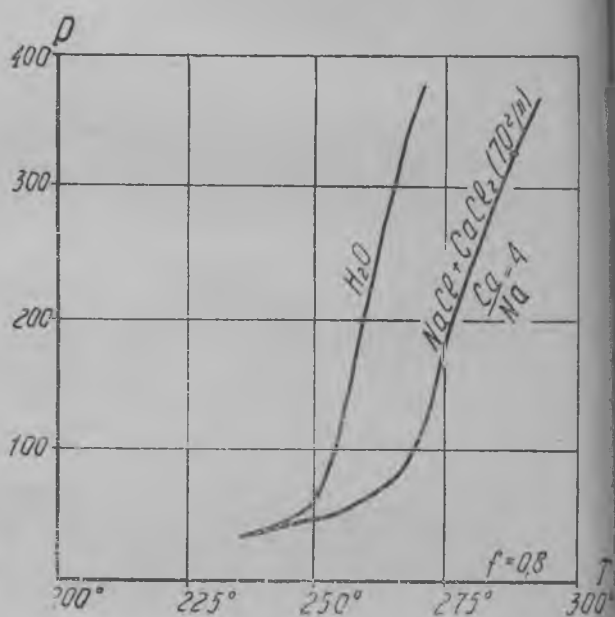


Рис. 7. PT — диаграмма раствора $\text{NaCl} + \text{CaCl}_2$ в сравнении с чистой водой (по Н. И. Хитарову и С. Д. Малинину)

PT — диаграмма для чистой воды и солевого раствора, отвечающего среднему составу содержимого включений (водный раствор хлористого кальцита и натрия, концентрацией 70 г/л с соотношением $\text{Ca} : \text{Na}$, как 4 : 1), показала, что в области низких температур при большом коэффициенте заполнения (80%) их термодинамические свойства близки друг к другу. Изохоры, как это видно на рис. 7, начинают заметно расходиться только выше 245° . Поэтому порядок давления в вакуолях жидких включений в кальците с достаточной вероятностью может быть выяснен по диаграммам состояния чистой воды.

По данным М. П. Вукаловича (1), давление насыщенных паров воды при максимальном в нашем случае удельном объеме 1,208 (степень заполнения 83%, см. табл. 1) и температуре 230° составляет 29 атм. В случае уменьшения удельного объема давление также будет понижаться и при среднем удельном объеме 1,06 (степень заполнения 94%) и температуре 120° составит около 2,5 атм.

Проведенные исследования позволяют сделать ряд важных выводов

об условиях образования месторождений исландского шпата Сибирской платформы.

1. В последнюю стадию гидротермального процесса во время роста кристаллов исландского шпата минералообразующие растворы были существенно хлоридными, малокомпонентными, содержащими Ca^{++} , Na^{+} ; HCO_3^{-} и CO_2 и практически лишенными SO_4^{--} и ионов тяжелых металлов.

2. Формирование месторождений происходило в близповерхностных условиях при небольших давлениях, не превышающих 30 атм. Постепенное снижение давления до обычного атмосферного способствовало спокойному удалению из раствора CO_2 и кристаллизации кальцита.

3. Исландский шпат образовался при низких температурах, в среднем колебавшихся от 150 до 40°. При этом наиболее высокая температура основной стадии кристаллизации свойственна исландскому шпату месторождений виллюйского типа (Джекинда, Мархая), затем в порядке понижения температуры следуют месторождения в мандельштейнах (Шпат), в шаровых лавах (Гончак) и в зонах дробления туфов (Янгуракта, Куктуле).

ЛИТЕРАТУРА

1. Вукалович М. П. Термодинамические свойства воды и водяного пара. Машгиз, 1955.
2. Григорьев Д. П. К вопросу о различии первичных и вторичных жидких включений в минералах. — Минералог. сб. Львовск. геол. об-ва, 1948, № 2.
3. Ермаков Н. П. Исследования минералообразующих растворов. Изд. Хагьковск. ун-та, 1950.
4. Киевленко Е. Я. Основные типы месторождений исландского шпата Сибирской платформы. — Тр. ВНИИП, 1957, т. I, вып. 1.
5. Скрыпшев А. В. Газово-жидкие включения в кристаллах исландского шпата. — Минералог. сб. Львовск. геол. об-ва, 1957, № 11.
6. Хитаров Н. И., Ренгартен Е. В., Лебедева Н. Е. Химический состав жидких включений исландского шпата и вопросы его генезиса. — Геохимия, 1958, № 3.

М. М СЛИВКО

О ВКЛЮЧЕНИЯХ РАСТВОРОВ В КРИСТАЛЛАХ ТУРМАЛИНА

Вводные замечания

Изучение остатков минералообразующей среды в минералах не затронуло в полной мере турмалина, и до сих пор по включениям в кристаллах этого минерала имеются лишь единичные исследования. Вместе с тем некоторые своеобразные особенности роста кристаллов турмалина, остающиеся подчас загадкой, могли бы быть расшифрованы при детальном изучении включений в турмалине, так как два явления — рост кристаллов и образование включений в них — теснейшим образом связаны друг с другом.

В настоящем сообщении излагаются результаты изучения включений в кристаллах полихромного турмалина некоторых месторождений Советского Союза (Средний Урал и Борщовочный кряж), проведенного в связи с общим минералогическим исследованием турмалинов этих и других районов СССР.

Изучению включений в турмалинах указанных районов посвящены единичные работы, которые, насколько известно, исчерпывают исследования включений в турмалинах всей территории Советского Союза. Первые сведения, касающиеся включений в турмалинах Борщовочного кряжа и Среднего Урала, находим в работе Н. П. Ермакова (2), где сравнительно кратко излагаются данные о первичных и вторичных включениях в полихромных турмалинах и подчеркивается, что первичные включения в турмалине Мурзинки гомогенизируются в газовой фазе при 340—355°. Вторичные включения оказались существенно жидкими, и гомогенизация их происходит в жидкой фазе.

В нашей работе (6) излагаются результаты изучения включений в турмалинах Борщовочного кряжа. В ней было показано, что первичные включения в зеленом и зональном розовом турмалинах гомогенизируются в жидкой фазе соответственно при 272 и 263—270°. Включений с гомогенизацией в газовой фазе не обнаружено. Впоследствии нами были проведены более тщательные исследования включений в многоцветных турмалинах Борщовочного кряжа и рассмотрены некоторые моменты образования и преобразования первичных и вторичных включений (7, 8).

О включениях в хромовом турмалине Среднего Урала можно найти сведения у Л. И. Колтуна (4), который указывает, что первичные включения в этих турмалинах гомогенизируются в жидкой фазе при 252—280°, а включения, гомогенизирующиеся в газовой фазе, отсутствуют совершенно.

На этом собственно исчерпывается список отечественных работ, в той или иной мере затрагивающих включения в турмалинах. Еще малочисленные работы по изучению включений в турмалине за рубежом (11).

Классификация включений и некоторые особенности их образования

Жидкие включения в турмалине — обычное явление, а некоторые кристаллы нередко переполнены ими. Необходимо отметить, что это совершенно не учитывается при химических и спектральных анализах турмалина, и особенно при определении удельного веса; между тем огромное количество включений не может не сказаться на результатах этих исследований. Безусловно, различным количеством включений объясняется приведенное в изумление Ж. и О. Бредли (10) разнообразие величины потерь в весе турмалина при нагревании. Однако этот вопрос остается открытым и требует специальных дополнительных исследований.

Наиболее часто встречаются в цветных турмалинах двухфазовые жидкие включения, причем содержание газовой фазы в них не превышает 35% объема вакуоли, исключая случаи явного расщурования. Однофазовые жидкие включения не характерны для турмалинов и наблюдаются в них очень редко. Незначительно распространены и многофазовые включения (жидкость — твердые фазы) без газового пузырька (рис. 1), а многофазовые включения жидкость — газ — твердые фазы, число которых часто достигает шести, широко распространены в кристаллах турмалина как Урала, так и Борщовочного кряжа (рис. 2, а и б).

Среди твердых фаз особенно выделяется широко распространенный минерал-«узник», встреченный во включениях в турмалине обоих районов. Этот минерал характеризуется следующими чертами:

- 1) форма кристаллов — таблички, удлиненные или приближающиеся к гексагонам в поперечном сечении;
- 2) чрезвычайно легкая растворимость; минерал энергично растворяется при подогревании пластинки до 35° и не выкристаллизовывается из раствора при комнатной температуре в течение нескольких месяцев;
- 3) низкие показатели преломления, анизотропия (8).

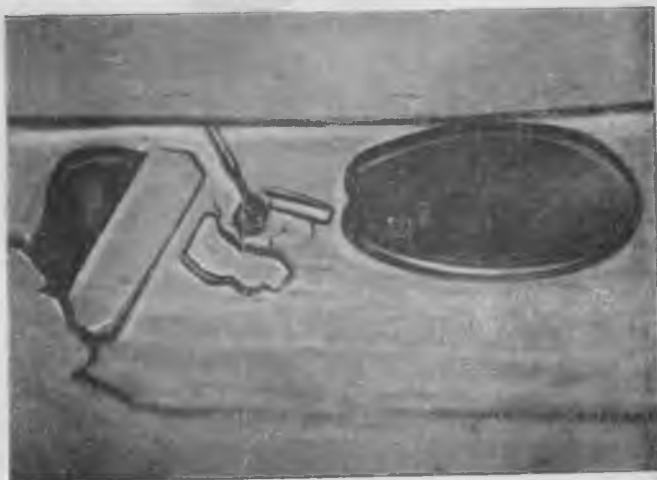
Эти признаки позволяют со значительной долей вероятности отнести минерал-«узник» к фтороборатам щелочей группы авогадрит — ферручит (1), однако для окончательного решения этого вопроса необходимы дополнительные исследования.

Следует отметить, что столь обычные во включениях других минералов (кварц, топаз и другие) такие минералы-«узники», как галит и сильвин, во включениях в многоцветных турмалинах не встречены. Очень редко (в единичных случаях среди сотен просмотренных пластинок) встречаются включения, содержащие жидкую углекислоту, причем количество ее незначительно. То же самое наблюдается и во включениях в кварце, кристаллы которого находятся в парагенезисе с цветными турмалинами, лепидолитом и альбитом (8).

По генетическому принципу, согласно классификации Н. П. Ермакова (2), среди жидких включений в турмалинах выделяются первичные, мнимовторичные и вторичные.



Рис. 1. Включения в жидкой и твердых фазах без газового пузырька. Борщовочный краж. Увеличение 200



a



б

Рис. 2. Многофазные включения в турмалинах:
a — Борщовочный краж. Увеличение 500; *б* — Средний Урал. Увеличение 60

Рис. 3. Включения, образовавшиеся в плоскости соприкосновения двух индивидов. Борщовочный краж. Увеличение 100

Изучение кристаллов в ультрафиолетовом свете

Изучение кристаллов в ультрафиолетовом свете имело своей целью установить наличие люминесцирующих примесей в исландском шпате, а также степень и характер их люминесценции, выявить закономерности в распределении примесей, а также обнаружить наличие возможной связи люминесцирующих примесей со степенью и характером окраски исландского шпата.

Просмотр в различной степени окрашенных и бесцветных кристаллов исландского шпата осуществлялся на люминесцентной установке, состоящей из аргоно-ртутно-катодной лампы (АРК-2), помещенной в железный кожух. Кожух имеет два отверстия размером 10×8 см, в которые вставлены светофильтры (кобальтовое стекло), пропускающие световые лучи с длиной волн 380Å и короче. Одно отверстие предназначено для просмотра объекта в проходящих лучах, другое находится внизу кожуха ниже уровня глаз наблюдателя и служит для изучения объектов в отраженных ультрафиолетовых лучах.

На этом приборе были просмотрены сотни образцов исландского шпата, выколотых по спайности (кристаллы с естественными гранями обычно покрыты матовой корочкой, поэтому внутренние их части на приборе просматриваются плохо).

В результате просмотра установлено следующее:

1. Большая часть бесцветных кристаллов совершенно не люминесцирует; однако встречаются бесцветные при обычном свете кристаллы, которые люминесцируют бледным желтоватым цветом.

Люминесцирующие участки иногда располагаются в кристалле в виде своеобразных «облаков», а иногда приурочены к зонам роста кристалла. Из этого можно заключить, что и в бесцветных при обычном свете кристаллах содержатся примеси, включенные при росте кристалла, о чем свидетельствует расположение их по зонам роста.

2. Кристаллы, имеющие желтую окраску (напомним, что разделенные кристаллы по характеру окраски можно произвести только до VIII класса), или не люминесцируют, или люминесцируют в незначительной степени, т. е. так же, как и бесцветные кристаллы.

Кристаллы, имеющие интенсивную желтую окраску (от VIII класса и выше), а также кристаллы желтые с красноватым оттенком, как правило, люминесцируют бледным желтоватым цветом, причем распределение люминесцирующих участков внутри кристаллов примерно такое же, как в бесцветных кристаллах, т. е. зональное. Эти данные прежде всего подтверждают правильность деления кристаллов по характеру окраски на два типа, произведенного макроскопическим путем, и, кроме того, свидетельствуют, возможно, о некотором различии природы веществ, окрашивающих исландский шпат в желтый цвет с красноватым оттенком и в желтый цвет чистой линии.

Ультрафиолетовый свет в самом начале наших исследований использовался для выяснения природы окраски исландского шпата. Кристалл, густо окрашенный в чайно-желтый цвет (XIV класс), был измельчен до порошкообразного состояния и смочен хлороформом, после чего подвергнут облучению ультрафиолетовым светом. Оказалось, что такой порошок люминесцирует бледно-голубоватым цветом, что весьма напоминает люминесценцию битуминозных пород. Эти данные позволили сделать предположение о наличии в окрашенных кристаллах органических веществ.

Необходимо особо подчеркнуть, что при подобном многоглавом росте кристаллов включения, лежащие в плоскости соприкосновения соседних субиндивидов, соответствуют различным периодам роста кристалла и могут заключать в себе маточные растворы различного состава и физико-химического состояния. Это необходимо учитывать при использовании включений для целей минералотермометрического анализа.

На некоторых кристаллах турмалинов Урала и Борщовочного кряжа наблюдается последняя зона роста, развитая только на моноэдре, причем в начале ее роста на бывшей грани моноэдра возникает множество мелких зародышевых кристалликов турмалина, которые впоследствии перекрываются. Во многих случаях такие кристаллики являются причиной образования трубчатых пустот, закупоренных вместе с содержащимся в них раствором или выходящих в виде полых трубок на поверхность кристалла. Особенно часто включения и полые трубки начинаются у кристалликов, наклоненных к плоскости моноэдра под наименьшим углом (8). Эти включения являются первичными только для последней зоны кристалла.

Вторичные и мнимовторичные включения. Возникновение этих генетических типов включений связано в основном с залечиванием трещин в кристаллах, хотя приводятся и некоторые другие случаи образования мнимовторичных включений (2). Для кристаллов турмалина характерными являются поперечные или близкие к ним по положению трещины, а вертикальные возникают очень редко и связаны главным образом с расщеплением сложного кристалла на отдельные индивиды по плоскостям их соприкосновения при совместном росте. Основным различием между мнимовторичными и вторичными включениями является то, что первые образуются за счет растворов, из которых продолжался рост кристалла, т. е. располагаются в трещинах, не выходящих на его поверхность, а вторые — из растворов, чуждых данному кристаллу. Здесь отметим одну деталь, которую необходимо учитывать при отнесении тех или иных включений к мнимовторичным или вторичным для кристаллов, рост которых может происходить только или преимущественно в одном направлении (турмалин, берилл¹ и т. п.). Залечивание трещин в таких кристаллах может происходить за счет растворов, из которых рост кристалла продолжается только на его головке при полном или практически полном отсутствии отложений родственного вещества на гранях пояса призм. В связи с этим образовавшиеся в трещинах включения имеют все формальные признаки вторичных, так как залеченные поперечные трещины секут все зоны кристалла, в том числе и самую внешнюю, но в действительности для данного кристалла в целом они являются мнимовторичными. Такое явление наблюдалось автором и раньше при изучении включений в турмалинах Борщовочного кряжа (8).

При поступлении раствора в поперечные трещины залечивание их происходит по-разному, в зависимости от толщины трещины. Если трещина по своим размерам незначительна, залечивание происходит обычно путем дендритного зарастания. В местах наибольшей мощности трещины образовавшаяся вакуоль преобразует свою форму, приобретая очертания, характерные для головок кристаллов турмалина. Иногда на ограничивающих включение поверхностях создается скульптура, такая же как на гранях пирамид или моноэдра. Образующиеся таким путем включения имеют очень сложные очертания, нередко с признаками расшнуровывания в процессе снижения температуры.

¹ Хорошо известны так называемые «отстоявшиеся» кристаллы берилла, у которых мутная нижняя часть кристалла закапчивается совершенно прозрачной головкой без всяких признаков прозрачной зоны на гранях призм, что свидетельствует о росте кристалла только вдоль L_6

Залечивание более широких поперечных трещин (обычно толще 0,5 мм) происходит путем многоглавого зарастания с образованием волокнистого прожилка, макроскопически выделяющегося на общем фоне кристалла своим шелковистым блеском. В этом случае, как и при многоглавом росте кристалла, возникают трубчатые включения.

Как уже отмечалось выше, продольные трещины в турмалинах создаются при расщеплении сложных кристаллов. Они обычно тонки, и при их залечивании образуются плоские включения самой разнообразной формы с множеством перемычек, что благоприятствует расшнуровыванию и образованию рядом расположенных включений с неодинаковым соотношением жидкой и газообразной фаз. Надо указать, что различать первичные и вторичные включения, ориентированные вдоль тройной оси кристаллов турмалина, трудно. В качестве вспомогательных критериев различия могут служить более простая форма первичных включений и более строгая связь их расположения с главной осью кристалла.

Об использовании включений в турмалинах для минералотермометрического анализа

Минералотермометрический анализ, основанный на фиксации температуры гомогенизации включений, играет важную роль в изучении самых различных вопросов минерагенеза (как отдельных минералов, так и целых минеральных месторождений). Применение этого метода к изучению многоцветных турмалинов также дало определенные результаты. Если до установления типа гомогенизации первичных включений в многоцветных турмалинах они считались типичными пневматолитовыми минералами, то уже первые исследования показали, что первичные включения в турмалинах Борщовочного кряжа гомогенизируются в жидкой фазе, а это однозначно определяет их как гидротермальные образования. В настоящее время с полной уверенностью можно говорить то же самое о турмалинах Шайтагена (Средний Урал), а также исходя из фактических данных П. Л. Уэйса (11) о турмалинах из пегматитов Блэк Хиллс в Южной Дакоте. Очень любопытным является и тот факт, что средняя температура гомогенизации первичных включений в многоцветных турмалинах колеблется в пределах 250—300° (8, 11); только единичные включения гомогенизируются при температурах несколько выше 300°, что является уже не правилом, а исключением.

Рассматривая возможность использования включений в многоцветных турмалинах для минералотермометрического анализа, необходимо остановиться на двух важных моментах, связанных с выбором включений, пригодных для гомогенизации:

1) правильное отнесение того или иного включения или группы включений к определенному генетическому типу;

2) вопрос герметичности закупорки включений в турмалинах.

Сложный и разнообразный механизм роста кристаллов турмалина, как видно из изложенного ранее, приводит к множеству способов образования включений, как первичных, так и мнимовторичных и вторичных. От правильного определения генетического типа включения зависит качество исследования. Поэтому при термометрическом анализе турмалинов этому вопросу надо уделять особое внимание и разобраться прежде всего в том, как рос изучаемый кристалл.

Важным представляется и вопрос герметичности закупорки включений в кристаллах турмалина. В первую очередь здесь возникают сомне-

ния о герметичности закупорки в волокнистых («скупенных») кристаллах. Несомненно, что не все включения в таких кристаллах удовлетворяют требованиям герметичности, предъявляемым при гомогенизации включений. Это также вызывает необходимость очень внимательного отношения исследователя к эксперименту.

Естественно, что при таком подходе изучение включений в турмалинах даст положительные результаты. И совершенно неверным является заключение в реферате статьи П. Л. Уэйса (11) о непригодности включений в турмалинах для гомогенизации¹.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дэна Дж. Д. и др. Система минералогии, т. II, полутом I. Изд-во ин. лит-ры, 1953.
2. Ермаков Н. П. Исследования минералообразующих растворов. Изд. Харьковск. ун-та, 1950.
3. Профеев М. Кристаллографические и кристаллооптические исследования турмалинов. — Зап. мин. об-ва, 1871, ч. 6, с. 81—342.
4. Колтун Л. И. Опыт генетического исследования некоторых эндогенных месторождений по включениям в минералах. Автореф. дисс. Львовск. ун-т, 1953.
5. Матвеев К. К. Из наблюдений над многоцветными турмалинами. В кн.: Вопросы минералог., геохим. и петр. М. — Л., 1946, с. 82—88.
6. Сливко М. М. О полихромных турмалинах. — Минералог. сб. Львовск. геол. об-ва, 1952, № 6.
7. Сливко М. М. Исследование турмалинов некоторых месторождений СССР. Автореф. дисс. Львовск. ун-т, 1954.
8. Сливко М. М. Исследование турмалинов некоторых месторождений СССР. Изд. Львовск. ун-та, 1955.
9. Ферсман А. Е. Очерки по истории камня, т. I. Изд-во АН СССР, 1954.
10. Bradley J. E. S., Olive Bradley. Observations on the colouring of pink and green tourmaline. *Miner. Mag.*, 1953, vol. 30, № 220.
11. Weis P. L. Fluid inclusions in minerals from zoned pegmatites of the Black Hills, South Dakota. *Amer. Miner.* 1953, vol. 38, № 7—8.

¹ Реферативный журнал «Геология и география», 1954, № 3. Реферат № 2733. Кстати, необходимо отметить то, что подобное заключение в самой статье П. Л. Уэйса отсутствует.

Л. С. ПУЗАНОВ

ТЕМПЕРАТУРЫ ГОМОГЕНИЗАЦИИ ВКЛЮЧЕНИЙ В ГОРНОМ ХРУСТАЛЕ ОЛГИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА ДАЛЬНЕМ ВОСТОКЕ

После выхода из печати книги Н. П. Ермакова «Исследования минералообразующих растворов» (2) термометрические исследования кристаллов горного хрусталя из различных месторождений пьезокварца приобрели весьма широкий размах.

Простота методики исследований и легкая доступность изготовления полированных пластин из кристаллов кварца дают возможность проводить массовые измерения температур гомогенизации включений растворов в кварце и тем самым объективно подходить к определению нижней границы температур и температурного режима образования месторождения.

Большое количество работ по термометрии включений в горном хрустале гидротермального происхождения показывает, что температуры их гомогенизации колеблются от 100 до 290° (1, 2, 3). В связи с этим высказывалось мнение, что из более высокотемпературных растворов не может образоваться значительных скоплений кондиционного горного хрусталя.

Не так давно на Дальнем Востоке было выявлено Олгинское месторождение пьезокварца в скарнах, причем выяснилось, что нижний предел температур образования кондиционных кристаллов горного хрусталя имеет более высокие значения, чем в других хрусталеносных районах.

Олгинское месторождение приурочено к верхнепротерозойским отложениям, развитым в пределах хребта Эзон в Верхне-Бурейском районе Хабаровского края, и расположено в 3—4 км от выходов малых интрузий биотитовых порфиридных гранитов послеверхнемелового возраста, имеющих пологую кровлю.

Верхнепротерозойские отложения представлены слюдистыми, кварцево-слюдистыми, углисто-слюдистыми сланцами и аркозовыми песчаниками с примесью карбонатного материала. Породы сложены в крупную антиклиналь северо-западного простираения, осложненную на крыльях мелкими складками, и имеют в районе месторождения углы падений от 30 до 70° на северо-восток.

В пределах месторождения развита серия малоамплитудных нарушений и зон интенсивной трещиноватости субширотных направлений с крутыми углами падения. Вдоль таких нарушений происходило поднятие послемагматических растворов, обусловивших формирование амфиболо-

пироксеновых и гранато-пироксеновых скарнов по пластам аркозовых карбонатных песчаников. Скарны содержат значительную вкрапленность крупночешуйчатого молибденита, самородного висмута, касситерита, галенита, сфалерита и имеют форму линзообразных пластовых залежей. К ним приурочены многополостные хрусталеносные жилы, не выходящие за пределы скарнов ни по падению, ни по простираанию. В районе месторождения расположены многочисленные рудопоявления вольфрамита, молибденита, касситерита и полиметаллов.

Хрусталеносные полости заполнены в основном тремолитом, обломками скарнов, глиной различной окраски, кварцевой дресвой, кальцитом и большим количеством кристаллов горного хрусталя, длиной от долей сантиметра до 0,5 м, большей частью 10—15 см. Кристаллы характеризуются

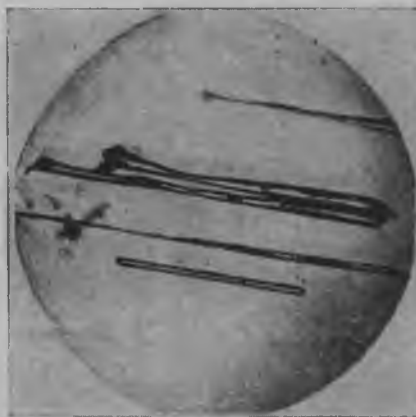


Рис. 1. Трубочатые сильно вытянутые включения. Видны твердые включения, от которых начинаются вакуоли. Увеличение 12

типичным обелисковидным габитусом и наличием молочно-белых кварцевых «рубашек», мощностью до 2—3 мм, покрывающих кристаллы целиком или же две-три грани призмы и соответствующие грани ромбоэдров. Значительно реже встречаются кристаллы без рубашки.

Основная масса кристаллов горного хрусталя имеет зональное строение, обусловленное чередованием бесцветных и дымчатых зон, закономерным расположением твердых включений актинолита, тремолита, хлорита и рудных минералов.

Из наиболее типичных кристаллов месторождения было выпилено 30 пластинок, ориентированных преимущественно вдоль оптической оси, которые тщательно осматривались и описывались под биноклем. На основании изучения пластинок, приуроченности включений к элементам роста кристаллов, системы трещин и зон представляется возможным наметить следующие виды вакуолей, содержащих в различных соотношениях газ и жидкость (включений с твердой фазой в кристаллах встречено не было).

1. Трубочатые ограниченные вакуоли, приуроченные к центральной части кристаллов и расположенные параллельно грани призмы, максимальной длиной до 5 мм и шириной 0,25—0,5 мм, заполненные газом в количестве от 70 до 80% их объема. В основании некоторых таких вакуолей наблюдаются твердые включения, осевшие на грани ромбоэдра из раствора во время роста кристалла. От таких включений иногда начинается образование вакуолей (рис. 1).

2. Трубочатые ограненные включения с соотношениями ширины к длине 1 : 3—4 (длина до 1 мм, ширина до 0,3 мм), приуроченные к следующей зоне, расположенной ближе к периферии кристалла, или к корневой части отдельных образцов. В таких вакуолях содержание газовой фазы колеблется от 50 до 60%.

3. Слабоограненные изометричные вакуоли, размером 0,1—0,2 мм, с газовой фазой, занимающей от 30 до 40%, приуроченные к центральной части кристаллов и системе залеченных трещин.

4. Трубочатые, обычно слабоограненные, вакуоли, расположенные в зоне, проросшей актинолитом, ближе к внутренней части кристалла. Размеры включений по длине колеблются в пределах десятых долей, а по ширине — в пределах сотых долей миллиметра; соотношение ширины к длине составляет 1 : 5—6. Включения имеют 75% газовой фазы.

Ближе к внешней части этой зоны наблюдаются такие же включения с 70% газовой фазы. Однако здесь же имеются округлые слабоограненные включения, с содержанием газа до 50%.

5. Среди мнимовторичных включений, расположенных по залеченным трещинам, рассекающим различные зоны кристаллов, отмечаются слабоограненные вакуоли, с различным соотношением фаз: в центральной части — от 30 до 40% газа, ближе к периферической части соответственно 10 и 5%. С приближением к периферии кристаллов вакуоли имеют более неправильную форму.

6. В молочно-белых рубашках, покрывающих грани кристаллов, развиты мельчайшие, преимущественно жидкие включения неправильной формы.

Гомогенизация включений, содержащих в различных соотношениях газ и жидкость, дала следующие результаты.

В сильно вытянутых трубочатых ограненных включениях, расположенных в центральной части кристаллов и содержащих от 70 до 80% газа, гомогенизация происходила в газовой фазе (по второму типу) при 295—325°.

Ближе к периферической части кристаллов, вплоть до зоны, содержащей игольчатый актинолит, в трубочатых вакуолях отмечается уменьшение газовой фазы до 50%, а также падение температуры гомогенизации от 320 до 300°. При этом интересно отметить, что 12 из имевшихся включений, содержащих около 60% газа, гомогенизировались по первому типу в жидкость. Ошибка в измерении объема для данного случая исключена, поскольку они замерялись в правильных трубочатых включениях.

Располагающиеся под актинолитовой зоной слабоограненные изометричные вакуоли с 30 и 40% газа гомогенизируются по первому типу соответственно при 310 и 315°. Они вторичны по отношению к центральной части, и их образование надо связывать с трещинами во внутренней части кристалла, которые были залечены в последующее время роста. Дальнейшее поступление растворов обусловило частичное протравливание поверхности кристаллов, а затем их регенерацию и отложение на зоны кварца с актинолитом. В этой зоне также намечается закономерное уменьшение к ее периферии количества газовой фазы во включениях и соответственно падение температур гомогенизации.

Трубочатые слабоограненные включения, расположенные в зоне, проросшей актинолитом, ближе к внутренней части кристалла имеют 75% газовой фазы и гомогенизируются при температуре 325°; ближе к периферии этой зоны во включениях газовая фаза уменьшается до 70%, а температура гомогенизации составляет 290°. Вне зоны актинолита вблизи граней кристаллов температура понижается до 230° во включениях, содер-

жащих 30% газа, причем устанавливаются температурные интервалы в 280 и 260°.

Мнимовторичные включения самых неправильных, часто ветвящихся форм, содержащие 15 и 10% газа, дают температуры гомогенизации соответственно 205 и 150°, а включения с 5% газа 115—120°. Такие включения, в значительной степени снижающие качество сырья, расположены вдоль залеченных трещин, не затрагивающих молочно-белой «рубашки».

Включения, расположенные непосредственно в молочно-белой «рубашке», содержат газа около 15% и гомогенизируются при 130°, что указывает на некоторое новое повышение температур поступавших растворов.

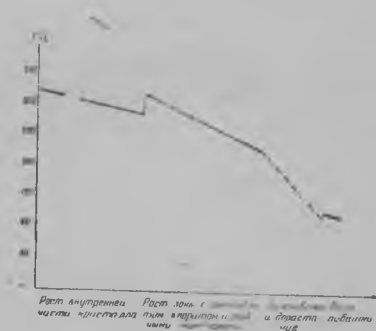


Рис. 2. График температурного режима растворов

Таким образом, самые конечные стадии формирования кристаллов горного хрусталя на Олгинском месторождении отличаются относительно высокими температурами кварцобразующих растворов по сравнению с другими отечественными месторождениями пьезокварца. Изменение температурного режима растворов представлено в виде графика (рис. 2). На нем четко видно двукратное повышение температур гомогенизации, связанное с поступлением новых порций растворов после тектонических подвижек.

Определение температур гомогенизации включений в горном хрустале, связанном со скарном, впервые было произведено Н. П. Ермаковым (2) для одного из рудных месторождений Дальнего Востока. Температуры гомогенизации включений в различных генерациях кварца данного месторождения показывают следующие значения: для длиннопризматических форм 300°, для дипирамидальных форм 100—130° и для зональных кристаллов от 300 до 140°. Включения в кварце из кварцево-дацитово-далитовой породы гомогенизируются при 320°.

Приведенные цифры весьма близки к температурам гомогенизации включений на Олгинском месторождении, что, вероятно, является характерным для кристаллов кварца, связанных со скарнами.

В дальнейшем, вероятно, будет возможно рассчитать давление, при котором происходило формирование Олгинского месторождения пьезокварца. Однако эта задача представляется очень сложной ввиду сравнительно небольшой разницы в температурах гомогенизации включений, содержащих газ в количестве от 80 до 50%. Последнее объясняется, очевидно, резким изменением режима давления во время роста кристаллов, учесть которое в настоящее время затруднительно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Захарченко А. И. Минералообразующие растворы и генезис кварцевых жил. Госгеолтехиздат, 1955.
 2. Ермаков Н. П. Исследования минералообразующих растворов. Изд. Харьковск. ун-та, 1950.
 3. Калюжный В. А. и Колтун Л. И. О давлениях и температурах при образовании минералов Нагольного кряжа. — Минералог. сб. Львовск. геол. об-ва, 1953, № 7.
-

А А ШАРКОВ

ТЕРМОМЕТРИЯ И СОСТАВ ЖИДКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ГОРНОМ ХРУСТАЛЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НАГОРНОГО ДАГЕСТАНА

Месторождения горного хрусталя в Нагорном Дагестане находятся в наиболее древних, интенсивно дислоцированных и метаморфизованных отложениях среднего и верхнего лейаса, протягивающихся полосой северо-западного направления. Эта полоса сложена мощной песчано-сланцевой толщей, собранной в крупную антиклинальную складку, которая простирается с юго-востока на северо-запад. Складка осложнена многочисленными, преимущественно согласными, тектоническими разломами, вдоль которых расположены дайки диабазов и многочисленные кварцевые жилы.

Вмещающими породами для кварцевых жил района являются песчаники, сланцы и диабазы. Однако подавляющее большинство хрусталеносных кварцевых жил локализуется в кварцевых песчаниках. Гнезда с горным хрусталем располагаются в центре жил и в их призальбандовых частях.

Микроскопические исследования показывают, что в кристаллах горного хрусталя содержится большое количество включений минералообразующих растворов, захваченных во время роста кристаллов. Включения растворов преимущественно жидкие, но с различным относительным количеством газа и твердых фаз. Во время гомогенизации все включения переходят в жидкую фазу, что свидетельствует об их гидротермальном происхождении.

Термометрические исследования проводились нами методом гомогенизации в термокамере, сконструированной Н. П. Ермаковым (1) и установленной на столике микроскопа. Температура гомогенизации определялась в кристаллах, извлеченных из кварцевых жил, залегающих в песчаниках, сланцах и диабазах. Из этих кристаллов было изготовлено более ста различно ориентированных по отношению к кристаллографическим элементам полированных пластинок, содержащих жидкие включения.

Жидкие включения концентрируются главным образом в корневых частях кристаллов и в меньшей степени в их головках. Основное число замеров было нами произведено по первичным включениям, располагающимся веерообразно от центра зарождения кристалла или вдоль его длинной оси вверх и в стороны, перпендикулярно к граням и по зонам роста кристаллов. Форма включений различная. Очень часты включения, имеющие форму негативных кристаллов, с хорошо выраженными гранями (рис. 1). Размеры включений исчисляются десятками, сотыми и тысячными долями миллиметра, редко 0,5—1 мм. Газовая фаза составляет

от 10 до 25% объема в многофазовых и до 15% в двухфазовых включениях; очень редко она достигает 40%. Твердые фазы представлены значительным количеством минералов-«узников» и минералов-«спутников». Объем первых обычно составляет от 2 до 25, а иногда 50 и более процентов.

Характерно для многофазовых включений то, что при нагревании минералы-«спутники» почти не растворяются даже при температуре 300°. При нагревании пластинок свыше 300° включения растрескиваются и происходит интенсивное побурение пластинок, что указывает на наличие в растворе значительного количества железа.

Многочисленные термометрические замеры в кристаллах показывают, что гомогенизация одно- и многофазовых включений происходит в основном при температуре от 105 до 200° (см. табл. 1).

Таблица 1

Средние температуры гомогенизации включений по зонам в кристаллах

Участок	Т° в зонах кристаллов			Колич. кристаллов	Число замеров
	внутренней	средней	внешней		
Инхокори	150	145	145	3	16
Шаитль	185	165	155	7	43
Ильян-Хеви	187	170	135	5	30
Кемер	193	174	135	10	51
Балакури	150	135	110	15	77
Гартель	150	130	105	5	30
Нагорное	170	150	145	6	30
Айшат-Кули	200	160	125	22	80
Дакки-Чай	140	130	120	4	10
Велькетиль	130	120	105	5	15

Из табл. 1 видно, что температура растворов при образовании кристаллов равномерно снижалась. Только в некоторых кристаллах с зональным строением одного из гнезд месторождения Айшат-Кули наблюдается резкое повышение температуры растворов в среднее время роста кристаллов.

Детально был изучен типичный кристалл, имеющий трехзональное строение. Внутренняя зона, в виде куполовидной головки, представляет собой «колпачок растворения», средняя зона образует фантом, ограниченный хлоритовой присыпкой, внешняя зона совершенно прозрачна. В жидких включениях внутренней зоны газовые пузырьки исчезали при температуре 160—150°, в средней гомогенизация происходила уже при 200—180° и во внешней зоне пузырьки исчезали при 170—160°. Гомогенизация мнимовторичных включений, расположенных в залеченных трещинках, происходила при 160—150° (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что кристаллизация кварца из растворов начиналась при температурах, соответствующих гомогенизации при 160—150°. Затем стали поступать новые растворы с повышенной температурой, которые вначале вызывали интенсивное растворение образовавшегося кристалла и последующее нарастание средней зоны.

Средняя зона кварца формировалась при температурах, соответст-

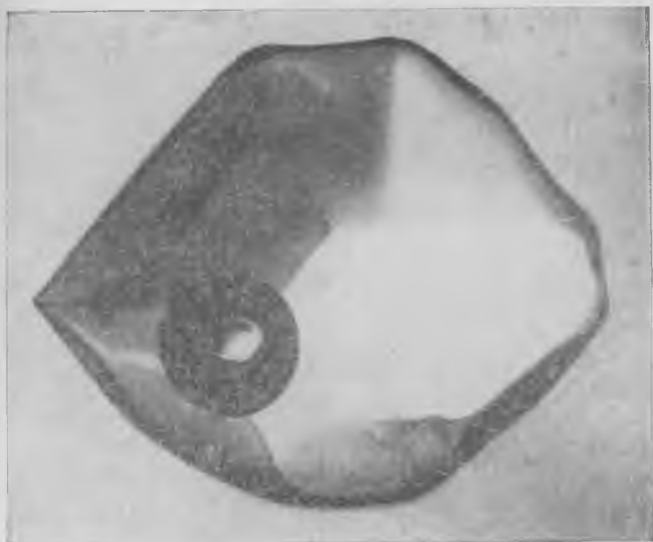


Рис. 1. Двухфазное жидкое включение. Форма негативного кристалла. Увеличение 330



Рис. 3. Многофазное жидкое включение. Внутри минералы-«узники» в виде шпаги. Увеличение 600



Рис. 4. Многофазное жидкое включение:
 а — водный жидкий раствор;
 б — газ; в — галит; г — сильвин;
 д — карбонат (?); е — неопределенный минерал. Увеличение 900



Рис. 5. Многофазное жидкое включение:
 а — водный жидкий раствор; б — газ;
 в — жидкая углекислота, г, д — неизвестные минералы. Увеличение 500

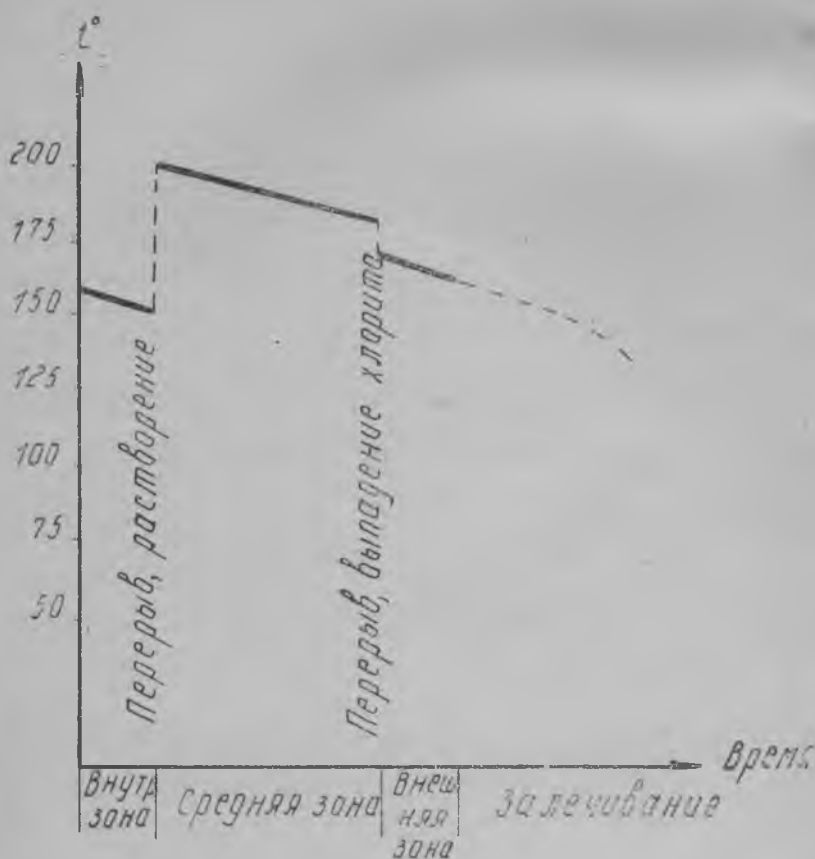


Рис. 2. Кривая температурного режима, роста трехзонального кристалла горного хрустала

вующих гомогенизации включений при 200—180°. Вторая стадия роста кристалла закончилась выпадением хлорита, облекшего фантом-кристалл.

В третью стадию минералообразования, протекавшую при температурах, соответствующих гомогенизации включений при 170—160°, образовалась внешняя прозрачная зона и залечивались трещины внутренних зон.

На основании полученных данных можно утверждать, что процесс образования кристаллов горного хрустала на месторождении Айшат-Кули характеризовался пульсационным поступлением гидротермальных растворов иногда с повышенной температурой.

В первичных жидких включениях содержится до трех различных минералов-«узников». Иногда не все они могут быть определены.

Наиболее распространены спутано-волокнистые агрегаты актинолита, состоящие из тончайших игольчатых кристаллов, легко ломающихся при бурном вскипании газовых пузырьков во время гетерогенизации. Эти агрегаты были определены нами как биссолит. Реже встречаются включения, по форме напоминающие молоточки или шпагу. Они образованы иголочками рутила и актинолита (рис. 3). Еще реже встречаются кристаллы галита и сильвина, на гранях которых нарастает неопределенный минерал, возможно карбонат (рис. 4).

Образование включений актинолита и рутила, по всей вероятности, произошло до начала роста кристаллов горного хрусталя, и впоследствии они были захвачены вместе с жидкостью. Наличие минералов-«спутников» характерно для включений, гомогенизирующихся как при более низких температурах (110—150°), так и при более высоких (150—200°).

Жидкая углекислота была отмечена только в нескольких кристаллах с месторождения Айшат-Кули. Она окружает газовые пузырьки (рис. 5) и при температуре 30—31° переходит в газ.

Для выяснения химического состава жидких включений растворы были нами экстрагированы, с последующим их отфильтрованием и упариванием, и затем были произведены микрохимические анализы (аналитик Т. И. Башмакова, ВИМС) четырех образцов из различных участков (табл. 2).

Таблица 2
Результаты микрохимических анализов водных вытяжек

Образец	166		119		180		284	
	мг/л	мг-экв.	мг/л	мг-экв.	мг/л	мг-экв.	мг/л	мг-экв.
Cl'	61,98	1,75	17,72	0,56	20,78	0,58	12,77	0,36
[HCO ₃]'	17,08	0,28	12,2	0,20	14,64	0,24	20,74	0,34
(SO ₄)''	34,23	0,71	24,85	0,52	22,97	0,48	26,72	0,56
SiO ₂	57,4	0,52	31,9	0,95	38,90	0,74	49,70	0,60
Ca''	14,23	0,71	21,35	1,06	16,17	0,80	14,88	0,74
Mg''	4,09	0,34	4,37	0,36	4,37	0,36	3,87	0,32
Na'	25,01	1,08	3,91	0,17	5,90	0,26	2,99	0,13
K'	9,62	1,13	6,52	0,64	6,69	0,62	7,67	0,67
С у м м а		6,52		4,46		4,08		3,72

Таблица 3
Результаты спектральных анализов сухих остатков фильтрата (в %)

Элементы	Обр. 166	Обр. 119	Обр. 180	Обр. 284
Si	>1	>1	>1	>1
Al	—	0,01	0,01	0,001—0,01
Mg	0,01	0,001—0,01	0,01—0,1	0,01—0,1
Ca	0,1	1	1	1
Fe	0,001	0,001	0,001	0,001
Mn	0,001—0,01	0,001	0,001	0,001—0,01
Ni	0,01	0,001	0,001—0,01	0,01
Ti	0,001	0,001	—	0,001
Cu	0,001—0,01	0,01	0,001—0,01	0,001—0,01
Pb	0,01	0,001—0,01	0,001—0,01	0,01
Zn	0,001—0,01	0,01	0,001—0,01	0,01
Na	>1	1	0,1—1	0,1—1
K	>1	>1	>1	>1

pH в экстрагированных включениях оказалось равным 7. 6.

Из приведенных данных видно, что в жидких включениях находятся очень слабо концентрированные щелочные водные растворы. Они содержат незначительное количество минеральных веществ с преобладанием хлоридов, в которых доминирует калий над натром.

Присутствует очень много карбонатов. Значительно также содержание сульфатов. Характерно присутствие довольно большого количества растворенного кремнезема.

При исследовании водных вытяжек мы также проверили спектральными анализами остатки фильтратов (табл. 3).

Данные табл. 3 показывают большое количество Si, Ca, Na и K в растворах; характерно преобладание калия над натрием. Почти постоянно присутствуют также Al, Fe, Ni, Ti, Cu, Pb и Zn.

Исходя из приведенного исследования, можно полагать, что формирование кварцевых жил и горного хрусталя происходило в небольшом интервале температур из слабощелочных гидротермальных растворов. Подавляющее большинство кристаллов горного хрусталя образовалось при постепенном понижении температур, иногда нарушаемом тектоническим раскрытием трещин и притоком новых растворов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ермаков Н. П. Исследования минералообразующих растворов. Изд. Харьковск ун-та, 1950.
2. Захарченко А. И. Минералообразующие растворы и генезис кварцевых жил. Госгеолтехиздат, 1955.

Г. Г. ГРУШКИН

**ОБ ИЗМЕНЕНИИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ
РАВНОВЕСИЯ ПРИ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИИ НА
ФЛЮОРИТОВОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ АУРАХМАТ****Общие сведения**

Месторождение Аурахмат приурочено к поверхности стратиграфического несогласия между массивными нижнетурнейскими известняками и налегающими на них кремнистыми сланцами верхнего турне, которые явились экранирующей покрывкой и создали застойные условия для растворов при минералообразовании.

В пределах поверхности несогласия главным структурным элементом, определяющим оруденение, являются оси мелких складок второго порядка, к которым приурочены куполообразные неровности размытой поверхности массивных известняков. Вокруг этих выступов жестких массивов образуются мелкие переклинные структуры облекания известняковых ядер сланцами. При односторонне направленном давлении в боковых частях куполообразной складки развиваются отслоения сланцев от массивных известняков, межформационные зоны дробления, трещины в известняках. Эти ослабленные и легко проницаемые зоны служат местом отложения гидротермальных минералов (рис. 1).

Вторым структурным фактором, определяющим оруденение, служит верхнепалеозойский Бричмуллинский надвиг, висячем крыле которого залегает месторождение Аурахмат. Надвиг этот обновлен альпийской тектоникой. В плоскости главного разрыва в обломках брекчии обнаружены пиритизация, окварцевание и отложение в мелких пустотах корок гребенчатого скаленоэдрического и призматического кальцита, вполне аналогичных встреченным на месторождении, что и дает основание рассматривать Бричмуллинский надвиг как главный рудовыводящий канал. В частности, таковым является оруденелый разрыв, срезающий западное крыло структуры (рис. 1).

Сочетание всех описанных структурно-литологических факторов определяет место и условия образования рудного тела.

Глубина формирования месторождения по восстановленной мощности разреза смытых пород составляет 2,5—3 км.

В районе развиты силлообразные межпластовые интрузии сиенит-монцитонитов висте — намюра. Сиенит-монцитониты содержат, по данным Н. А. Смольянинова (16), до 0,23% F. Нами наблюдались тонкие примазки фиолетового флюорита по трещинам в этих породах и в связанных с ними роговиках. По аналогии с соседними районами возраст флюо-

ритового оруденения определяется как верхнепермский или нижнетриасовый. Таким образом, непосредственной связи между флюоритовым оруденением и материнскими интрузиями не обнаруживается.

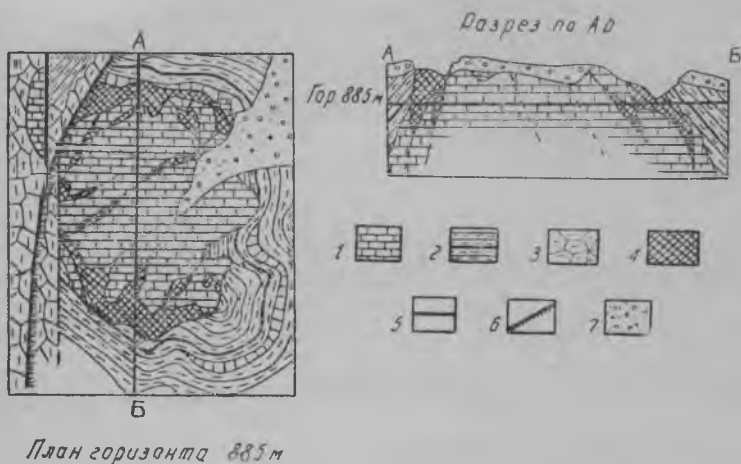


Рис. 1. Схема геологического строения месторождения Аурахмат:

1 — массивные известняки; 2 — кремнистые сланцы с прослоями известняков; 3 — дробленные сланцы; 4 — рудное тело; 5 — рудоподводящий канал; 6 — Бричмуллинский надвиг (обновленный в альпийское время); 7 — галечник речных террас

Выделение главнейших минералов рудного тела происходило в следующем порядке: флюорит, барит, сульфиды, кварц, кальцит. Такой порядок определен по совокупности признаков—пересечений, облеканий и замещений для каждой пары минералов. Главные минералы—флюорит, кварц и кальцит—представлены несколькими генерациями. Для флюорита их установлено пять: темно-фиолетовый (зональный), фиолетовый (с зональностью, параллельной граням куба и додекаэдра), синеватый прозрачный, зеленоватый (с зональностью, параллельной граням куба и октаэдра) и, наконец, флюорит розовый. Кварц представлен четырьмя генерациями—коротко-столбчатый полупрозрачный, гребенчатый прозрачный, игольчатый мелкокристаллический, роговиковый. Кальцит также имеет четыре генерации: молочно-белый, коричневатый марганцево-железистый (ромбоэдр, скаленоэдр, призма), крупнокристаллический полупрозрачный (скалепоэдр, усложненный комбинациями полукруглых граней) и короткопризматический прозрачный.

Результаты изучения температурного режима образования месторождения

Ниже приводятся основные результаты измерений температур, при которых образовались главные гипогенные жильные минералы месторождения. Эти измерения производились методом гомогенизации жидких включений со всеми неизбежными ограничениями точности определений, присущими самой методике. Изучение трех минералов, слагающих до 95% всей массы руд месторождения—флюорита, кварца и кальцита,—производилось отдельно для каждой генерации. При этом выявлены

особенности хода температур отложения генерации, пределы температур и т. д.

Всего произведено 680 определений температур гомогенизации. Большинство их относится к первичным включениям, захваченным при росте кристалла, меньшее число образовалось позднее, очень немногие относятся к включениям растворения (5). Результаты измерений сведены в табл. 1.

Таблица

Последовательность выделения и температуры образования главнейших гипогенных минералов

Генерация флюорита	Температуры гомогенизации включений (в °C)		
	первичные	мнимовторичные в залеченных трещинах	включения растворения
Темно-фиолетовый зонарный	149—147—144°	149—147—142—138—133—131°	142—122°
Фиолетовый зонарный	180—172—168—164—151—147—133°	184—168—160—151—149—147—144—133°	206—200—192—188—172—158—150—115°
Чуть синеватый прозрачный	160—135—133—129°	164—160—156—151—147—135°	208—164—151—105°
Зеленоватый	210—205—190—156—151—147—140—133—131—113—105°	188—156—151—147—145°	233—210°
Розоватый	—	121—119—115—101—90°	—

Привлекают внимание одинаковые температуры гомогенизации первичных включений, а также мнимовторичных в залеченных трещинах. Совпадение температур говорит о том, что растрескивание и залечивание кристаллов и их дальнейший рост идут одновременно на фоне многократно возникающих тектонических подвижек, обуславливающих появление новых порций растворов. Залечивание внутренних частей кристалла происходит одновременно с кристаллизацией его внешних слоев с соответствующим образованием мнимовторичных или первично-вторичных включений (6). Различие в температуре растворения (233—105°) и кристаллизации (210—105°) флюорита свидетельствует о том, что растворение его вызывалось изменением не температуры, которая совпадает с температурой кристаллизации, а солевого состава и концентрации растворов фтористой и кремнистой стадий процесса в результате притока раствора иного состава.

Из четырех генераций кварца термометрическому изучению удалось подвергнуть только две — короткостолбчатый полупрозрачный и прозрачный гребенчатый. Остальные две разновидности кварца — мелкокристаллические игольчатый и роговиковоподобный — газовой-жидких включений не содержат.

Результаты изучения двух первых генераций кварца по данным 450 измерений

Генерации кварца	Температуры гомогенизации включений (в °C)	
	первичные	вторичные включения в залеченных трещинах
Кварц-1, короткостолбчатый полупрозрачный	Центральная часть кристалла—219°	192°
	Средняя часть кристалла—196°	168
	Краевая часть кристалла—193°	144
		138
Кварц-2, гребенчатый прозрачный	144°	129

Из приведенной таблицы следует, что процесс кристаллизации кварца первой генерации происходил при постепенном понижении температуры.

Мнимовторичные включения в кварце-1 образовались при 192—129°, верхняя точка здесь отвечает температуре кристаллизации наружных слоев кварца первой генерации (193°). Это говорит о том, что растрескивание кварца первой генерации и его залечивание началось после окончания роста кристаллов. Кварц второй генерации образовался при 144°, т. е. при температуре залечивания трещин в кварце первой генерации. Это обстоятельство позволяет с достаточной долей вероятности предполагать, что в интервале 138—129°, когда происходило залечивание в кварце-1, имела место кристаллизация третьей и четвертой генераций кварца, а гребенчатого кварца второй генерации — при 168°.

В кристаллах же кальцита второй и третьей генераций, обнаружено мало включений. Всего сделано около 30 определений. В результате установлено, что кальцит второй генерации образовался при 98—78°, третьей — при 81—66°.

Для построения графика температур гомогенизации включений была проведена пространственная привязка местоположения включений в кристаллах разных генераций.

При гомогенизации первичных включений, располагавшихся в кристалле в плоскостях, параллельных граням кристалла, были найдены средние значения для каждой такой плоскости; затем для получения пространственного масштаба были измерены расстояния плоскостей от наружной грани кристалла. На рис. 2 по горизонтали отложены расстояния включений от наружной грани кристалла, а по вертикали — температуры соответственных замеров; пунктирные линии — предполагаемый ход температуры в непромеренной части кривых. Левые концы кривых показывают центры соответствующих кристаллов.

Из графика видно, что температура кристаллизации кварца и флюорита двух разных месторождений, с момента зарождения и почти до конца роста кристалла, оставалась на одном уровне, и только перед самым окончанием роста произошел резкий стремительный ее спад. Амплитуда спада достигает 40—50°. В короткостолбчатом кристалле кварца из Аурахмата кривая спада температуры осложнена промежуточной ступенькой. В результате этого прозрачная центральная часть кристалла облека-

ется слоем мутной переполненной жидкими включениями рубашки, толщиной 2—3 мм.

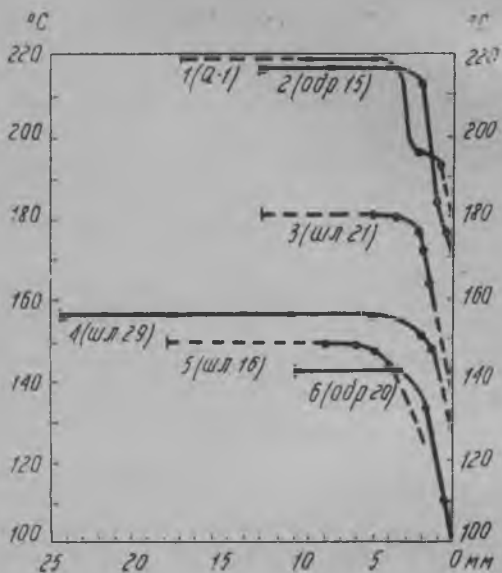


Рис. 2. Кривые хода температур при росте кристаллов кварца (1,2) и флюорита (3—6), из Аурахмата (1, 3, 4, 5) и Чатмазара (2,6)

На рис. 3 представлена парагенетическая схема последовательности отложения минералов и хода температурного режима каждого из этапов рудного процесса. Из нее видно следующее:

- 1) процесс рудообразования протекает сначала на фоне общего подъема температуры, а затем ее общего постепенного спада;
- 2) для ряда генераций намечается верхний и нижний температурные пределы их образования; эта разность в общем увеличивается с приближением к точке перегиба между подъемом и спадом температур;

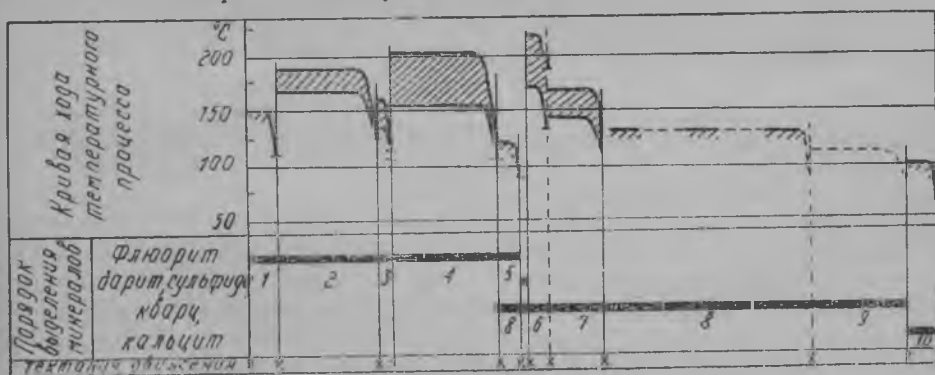


Рис. 3. Схема последовательности выделения и температур образования гипогенных минералов из Аурахмата:

- 1 — темно-фиолетовый зонарный флюорит; 2 — фиолетовый зонарный флюорит; 3 — синеватый, прозрачный флюорит; 4 — зеленоватый флюорит; 5 — розовый флюорит; 6 — столбчатый кварц; 7 — гребенчатый кварц; 8 — мелкокристаллический игольчатый кварц; 9 — роговиковый кварц; 10 — кальцит (ромбоэдр → скаленоэдр → призма)

3) процесс рудообразования не является непрерывным; на своем протяжении он подразделяется на ряд последовательно сменяющихся друг друга этапов; установленные перерывы отвечают либо смене одного минерала другим, либо смене одной генерации минерала другой, более поздней; для большинства генераций, разделенных перерывами, устанавливается, что момент смены одной генерации минерала другой совпадает с моментами проявления внутриминерализационных тектонических подвижек;

4) поправка, прибавляемая к замерам температур гомогенизации флюорита, по диаграмме Г. Г. Леммлейна и П. В. Клевцова (12), составляет для темно-фиолетового флюорита 16° , для фиолетового 27° , для зеленоватого 33° .

Солевой состав и концентрация растворов

С помощью термометрических измерений и по морфологическим признакам был выделен слой флюорита, толщиной 2 см, весом 2—3 кг, для пробы. Часть этой пробы была истерта и затем экстрагирована, а из другой части было определено валовое количество воды, содержащейся во включениях. Экстрагированный раствор был подвергнут микрохимическому анализу (табл. 3).

Таблица 3

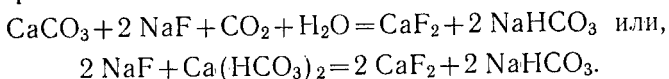
Результаты определений анионов и катионов методами количественного микрохимического анализа, пересчитанные на вероятный состав солей, выраженный в процентах

Состав солей	Флюорит		
	темно-фиолетовый	фиолетовый	зеленоватый
KCl	4,987	0,616	0,369
NaCl	4,560	6,515	0,415
NaF	1,045	0,357	0,338
CaCl ₂	1,283	0,376	—
MgCl ₂	—	1,265	—
Ca(HCO ₃) ₂	—	0,762	3,046
NaHCO ₃	—	—	1,523
С у м м а	11,875	9,891	5,691
рН	7,0	7,3	7,6

Из приведенных результатов видно, что солевой состав флюоритобразующих растворов в отдельные этапы процесса закономерно изменяется от хлоридов и фторидов щелочей до бикарбонатов натрия и кальция. Это изменение сопровождается повышением щелочности раствора. Оно было обусловлено в основном влиянием внешней среды; замещение вмещающих известняков фторидами сопровождалось выделением значительного количества кальция и CO₂; кальций связывается частью в виде флюорита, частью в виде бикарбоната. Увеличение концентрации бикарбоната кальция в растворе обуславливает изменение характера рН раствора от нейтрального до слабощелочного. Кристаллизация флюорита сопровождается

непрерывным падением общей концентрации солей, находящихся в растворе. Особенно характерно падение концентрации фтористого натрия с одновременным увеличением концентрации бикарбоната.

А. С. Уклонский (17, 18) и Н. А. Смольянинов (16, стр. 44 и 94) считают, что минералообразование на месторождении Аурахмат происходило по следующей схеме: $3 \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{SiF}_6 = 3 \text{CaF}_2 + \text{SiO}_2 + 3 \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$. Из нее видно, что кварц и флюорит кристаллизуются одновременно, при этом три частицы известняка замещаются тремя молекулами флюорита и одной кремнезема. Однако эти построения не подтверждаются исследованием химического состава газовой-жидких включений (4). В составе солей включений во флюоритах установлены NaF , $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, NaHCO_3 . На основании этого мы можем предложить для фтористого этапа следующую схему реакции:



Для кремнистого этапа рудного процесса исследовать состав жидких включений не удалось. Учитывая присутствие щелочей в составе растворов предшествующего этапа и опираясь на экспериментальные исследования Н. И. Хигарова (19), а также других авторов и на теоретические обобщения А. Г. Бетехтина (1), мы можем считать основной схемой реакции переноса и отложения кремнезема следующую: $x\text{Na}_2\text{O} \cdot y\text{SiO}_2 + 2 \text{HCl} = y\text{SiO}_2 + 2 \text{NaCl} + x\text{H}_2\text{O}$, согласно которой при понижении температуры силикат натрия распадается с выделением кремнезема.

Из приведенных данных следует, что перенос и отложение фтора, по видимому, происходят в основном при участии фторидов и щелочей, а перенос и отложение кремнезема — при участии хлоридов и щелочей, смена которых во времени в составе глубинных растворов может быть главным фактором отложения основных минералов месторождения: сначала флюорита, а затем кварца.

Представление об этапах развития рудного процесса весьма важно потому, что оно существеннейшим образом отражается на познании закономерностей пространственного размещения промышленного оруденения в месторождениях.

Следует оговориться, что последнее утверждение не отвергает возможности совместного отложения флюорита и кварца, например, в короткий период смены фторидов щелочей хлоридами и совместного отложения флюорита и кварца (рис. 3).

Изменение величины рН в ходе рудного процесса

Выше уже упоминалось, что при исследовании состава газовой-жидких включений в ряде генераций флюорита были определены значения величины рН природных растворов во включениях (4). Значения эти для темно-фиолетового, наиболее раннего флюорита равны 7.0, для фиолетового — 7.3, для зеленоватого — 7.6. В дополнение к сказанному приведем следующие косвенные данные. Отложение зеленоватого флюорита в самые конечные моменты нарастания внешнего слоя вещества, как показали наши исследования (3), сопровождается образованием присыпок каолинита, который доказан химическим, иммерсионным, термическим, рентгеноскопическим методами исследования.

По экспериментальным данным (14, 20, 21), каолинит при низких температурах воспроизводится только в слабокислых и кислых растворах.

Температура кристаллизации слоя флюорита с присыпками каолинита низкая = 105°, что позволяет считать данный каолинит отложившимся в слабокислой среде (3). Отлагающийся вслед за зеленоватым розоватый флюорит (температура кристаллизации 121—90°) образует в корковых рудах следующую последовательность слоев (в мм): розоватый флюорит — 5, почковидный натечный барит — 5, розоватый флюорит — 2, розоватый натечный барит — 3, желтоватый железисто-магнезиальный кальцит — 7, сахаровидный розоватый флюорит — 2, полупрозрачный кальцит — 10 (4). Как известно, барит для своего осаждения также требует кислой или слабокислой среды.

Проведенное изучение последовательности выделения минералов (каолинит, барит) позволяет утверждать, что слабощелочная среда фтористого этапа рудного процесса в самом конце отложения флюорита сменялась слабокислой, а отложение сфалерита и галенита, цементирующих обломки барита и выполняющих мелкие трещины в последнем, говорит о новом изменении значения рН раствора от кислого к щелочному. Таким образом, непосредственными исследованиями растворов и косвенными заключениями по парагенезису минералов устанавливается, что процесс рудоотложения сопровождается колебанием величины рН раствора около нейтрального значения.

Причина изменения зависит от изменения концентрации активного кислорода, зона проникновения которого, как известно, достигает глубины 3 км и больше. Изменения величины рН в ходе рудного процесса, связанные с изменением концентрации кислорода в рудообразующих растворах, позволяет признать, согласно представлениям А. Г. Бетехтина (1), тесную парагенетическую связь между баритом и сульфидами и возможность появления при наличии благоприятных условий в кварцево-барито-флюоритовых жилах сульфидов полиметаллов, примером чему может служить флюорито-барито-полиметаллическое месторождение Наугарзан и другие.

Давление в процессе рудообразования

Для каждой из трех исследованных генераций флюорита были вычислены давления, при которых происходило отложение данной генерации (2). Для расчета давлений необходимо было вычислить на основании массовых замеров среднюю температуру гомогенизации включений каждой генерации и среднее содержание объема газовой фазы включения к общему объему включения. Результаты такого изучения приведены ниже.

Таблица 4

Результаты определения средней температуры гомогенизации включений

Генерации флюорита	Число замеров	Средняя Т° гомогенизации	Отношение v газа к V всего включения (в %)	Рассчитанные давления (в атм)
Темно-фиолетовый	258	149	2,734	240
Фиолетовый	484	180	2,074	425
Зеленоватый	240	205	2,144	620

Методика расчета давлений проста. Было установлено, что если учесть прирост объема полости включений за счет коэффициента объемного расширения минерала при нагревании от 20° до температуры гомогенизации и объемное расширение жидкой фазы включения для тех же пределов температур, то из-за большего коэффициента объемного расширения жидкости заполнение всей полости включения жидкой фазой должно произойти при температуре, значительно более низкой, чем температура гомогенизации. Следовательно, при нагревании до температуры гомогенизации развивается давление, которое сжимает объем жидкости до постоянного объема включения. Разница температуры между фактической и вычисленной точками гомогенизации, помноженная на коэффициент объемного расширения жидкости в этом температурном интервале, позволяет найти тот дополнительный объем, который должен быть сжат, чтобы сохранилось в силе уравнение постоянного объема. Результаты расчетов помещены в табл. 4.

Вычисленные величины давлений, хотя еще очень приближенные (точность порядка 10%), указывают тем не менее на то, что в процессе минералообразования давление для одной и той же глубины от поверхности сильно меняется — в нашем примере от 240 до 625 *атм*. Этот экспериментальный результат опровергает известное представление В. Линдгрена о существовании прямой пропорциональности между температурой, давлением и глубиной залегания месторождения от поверхности, которую он принял в качестве основного принципа генетической классификации гидротермальных рудных месторождений.

Наиболее вероятная глубина формирования изучаемого месторождения от современной ему поверхности, судя по реконструкции разреза, составляет 2,5—3 *км*. Давление столба воды для глубины 2,5 *км* равно 250 *атм*, а статическое давление толщи вышележащих пород — 625 *атм*. Если мы с этими цифрами сравним расчетные величины давлений 240—620 *атм*, то увидим, что пределы вычисленных давлений совпадают с цифрами давления столба воды и внешней нагрузки пород для глубины 2,5 *км*. Будут ли пределы колебаний давлений определяться подобными соотношениями в других случаях, сейчас еще сказать трудно, особенно для минимального предела давлений. Что же касается верхнего предела давлений, можно думать, оно вряд ли сможет превысить внешнее давление нагрузки пород, ибо в таком случае внутреннее давление системы, будучи больше внешнего, должно разрядиться в явлениях взрыва, механических нарушений вдоль рудных каналов или просачивания сквозь толщу пород. Судя по первым результатам расчетов, давление, так же как и температура, может служить критерием глубины образования месторождений только тогда, когда изучен их верхний и нижний пределы, в то время как единичный замер дает весьма относительную цифру. Следовательно, изучая месторождение, необходимо стремиться вычислить давление всех по возможности этапов рудного процесса.

Полученные цифры давлений позволяют вычислить разницу температуры и давлений между первой — второй и второй — третьей генерациями флюорита, равную соответственно 31° и 185 *атм* и 25° и 195 *атм*, или на 1° — 6 *атм* и на 1° — 8 *атм*. Если считать прирост давления в 6 *атм* на каждый градус нагрева зависящим от повышения температуры новых порций глубинных гидротерм, поскольку $P=f(T)$, то дополнительный прирост в 2 *атм* для поздних генераций флюорита можно объяснить только увеличением содержания в составе растворов бикарбонатов и CO_2 в результате прогрессирующего замещения вмещающего известняка

флюоритом, что отчетливо выражено в химическом составе включений (табл. 3).

Об изменении в ходе рудного процесса физико-химических факторов равновесия

Генетические особенности всякой природной системы находят отражение в ее основных физико-химических факторах равновесия (температура, давление, концентрация и солевой состав растворов и т. д.), которые находятся во взаимной связи.

Процесс образования флюоритового месторождения Аурахмат разделяется на ряд последовательных ступеней (стадий, этапов), разделенных перерывами. Отдельные этапы отвечают либо смене одного минерала другим, либо смене одной генерации минерала другой. Смена стадий процесса рудообразования сопровождается тектоническими движениями, причем в ряде последовательных генераций флюорита изменяются температура, солевой состав и концентрация компонентов в растворах, величина рН раствора, давление, окраска и форма кристаллов.

Поскольку описываемое месторождение связано с региональным разломом, можно считать, что тектонические движения влияли на минералообразование и на прерывность рудного процесса; они отражали при этом напряженные тектонические явления этого крупного нарушения, обеспечивающего доставку рудообразующих погоннов от глубоко залегающих источников минерализации к месту рудоотложения. Связь обновлений процесса с тектоническими движениями является характерной чертой месторождений данного генетического типа.

В изучаемом случае мы видим наглядный пример подтверждения пульсационной гипотезы С. С. Смирнова (15), так как здесь каждая новая стадия в развитии процесса характеризуется поступлением на место рудоотложения рудоносных растворов иного качества.

На основании анализа температурной кривой рудного процесса можно предполагать, что движение рудоносных растворов не представляет непрерывного постоянного потока, а совершается в виде отдельных этапов замедленного и затухающего к концу течения гидротерм, разделенного проявлениями тектонических подвижек, знаменующих наступление новой пульсации.

Судя по изложенным фактам, а также по тому, что кристаллизация минералов отдельных генераций сопровождается в момент окончания роста минерала стремительным падением температуры на величину порядка 40°, резко обрывающим данную стадию процесса, можно предполагать, что образование минералов происходит в условиях относительной замкнутости стадий; такая стадия связана, по-видимому, с тектоническим и кристаллизационным «запечатыванием» отдельных участков месторождения¹.

К такому же выводу, на основании анализа чисто геологических закономерностей, пришли также В. Э. Поярков и А. В. Королев (13), а Г. Г. Леммлейн и Б. Я. Осадчев (11) описали альпийскую жилу, в которой причина появления окрашенных кварцев в нижней части крупно-

¹ Этим, вероятно, и объясняется тот факт, что рудовмещающими преимущественно являются системы оперяющих трещин и зон дробления второго и третьего порядков, в которых условия периодического замыкания создаются легче, чем в крупных региональных рудоподводящих разрывах, где постоянные движения и свободное протекание растворов не создают необходимых условий для задержки растворов и отложения минералов.

друзовой полости объясняется чрезвычайно медленными конвекционными токами в минералообразующем растворе, заполнявшем полость жилы, т. е. условиями, которые могли возникнуть только в относительно замкнутой системе.

Н. П. Ермаков (6) нашел, что относительные колебания температуры роста крупных кристаллов оптического флюорита в одном и том же погребе не превышали 2—4°, т. е. что кристаллы росли практически при одинаковой температуре, а это могло осуществляться только при условии относительной замкнутости полости погребка. Точно о такой же относительной замкнутости отдельных этапов рудного процесса идет речь в описываемом месторождении Аурахмат.

Все это вполне увязывается с существующими представлениями о гидротермальных месторождениях как об открытых системах. Они открыты постольку, поскольку представляют смену ряда относительно замкнутых этапов. Картина этой прерывности (пульсаций) выявляется в форме спадов температурной кривой (рис. 3), в смене ряда этапов крайне замедленной циркуляции растворов, в обновлении в каждой новой стадии процесса состава растворов, с периодически возникающими тектоническими подвижками, нарушающими замкнутость.

Нам представляется, что предлагаемая выше форма парагенетических диаграмм (рис. 3) может иметь классификационное значение для понимания коренных отличий открытых гидротермальных систем от природных систем других генетических типов. Температурный режим процесса рудообразования, связанный с моментами тектонических внутриминерализационных движений, выражен прерывистой температурной кривой. Процесс отложения минералов возобновляется с каждой очередной подвижкой и обновлением состава растворов. Это сначала происходит на фоне общего подъема температур, а затем на фоне его постепенного спада. Частым нарушением физико-химического равновесия в этом случае отвечает большое разнообразие гидротермальных образований, представляющих продукты раздельной дестилляции.

Д. С. Коржинский (7—10) посвятил серию статей разработке вопросов физико-химического анализа метасоматической зональности при окололлотрецинном метаморфизме и правилу фаз в открытых системах с вполне подвижными компонентами. Изложенные выше результаты по изучению изменчивости физико-химических факторов равновесия в ходе рудного процесса позволяют ставить вопрос о том, как приложить физико-химические построения Д. С. Коржинского к анализу конкретных месторождений и зон околожильного гидротермального метаморфизма.

Считая, как и Д. С. Коржинский, минеральное выполнение тела жил и околожильные изменения вмещающих пород единым и неразрывным процессом, мы неизбежно обязаны допустить, что качественные изменения в составе рудообразующих растворов, которые Д. С. Коржинский в упомянутых статьях не учитывает, могут вызвать различные изменения в боковых породах (зональность) совсем не в результате взаимодействия одного и того же изначального раствора при его инфильтрационном просачивании в стенки трещины, как это обосновывает в своих уравнениях Д. С. Коржинский.

Методика физико-химического анализа Д. С. Коржинского разработана, как подчеркивает сам ее автор, для относительно замкнутой системы и, следовательно, в обычных гидротермальных жилах может быть применена только при анализе отдельного этапа ее формирования, для которого будет доказано, что в нем не наложились друг на друга различные по времени и химизму процессы. Сделанный вывод требует, преж-

де чем приступить к физико-химическому анализу жил по методу Д. С. Коржинского, знания того, какие изменения в боковых породах связаны с качественным изменением состава растворов во времени и какие — с явлениями инфильтрационной метасоматической зональности. Иначе качественно необратимое развитие рудного процесса во времени и пространстве может оказаться подмененным схемой одной пространственной эволюции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бетехтин А. Г. Гидротермальные растворы, их природа и процессы рудообразования. В сб.: Осн. пробл. в учении о магматог. рудн. м-ниях. Изд-во АН СССР, 1953.
2. Грушкин Г. Г. Газово-жидкие включения как минералогический манометр.— Зап. Всер. мин. об-ва, 1953, ч. 82, № 2.
3. Грушкин Г. Г. Генетическое значение «присыпок» на минералах.— Минералог. сб. Львовск. геол. об-ва, 1954, № 7.
4. Грушкин Г. Г. и Приходько П. Л. Об изменении химического состава, концентрации и pH газово-жидких включений в ряде последовательных генераций флюорита.— Зап. Всер. мин. об-ва, 1952, ч. 81, № 2.
5. Грушкин Г. Г. и Хельвас И. Г. Генетические типы жидких включений и температуры их образования во флюоритах.— Тр. Ин-та геол. АН УзССР, 1951, вып. 6.
6. Ермаков Н. П. Исследования минералообразующих растворов. Изд. Харьковск. ун-та, 1950.
7. Коржинский Д. С. Метасоматическая зональность при околотрещинном метаморфизме и жилы.— Зап. Всер. мин. об-ва, 1946, ч. 75, № 4.
8. Коржинский Д. С. Открытые системы с вполне подвижными компонентами и правило фаз.— Изв. АН СССР, сер. геол., 1949, № 2.
9. Коржинский Д. С. Инфильтрационная метасоматическая зональность и образование жил.— Изв. АН СССР, сер. геол., 1951, № 6.
10. Коржинский Д. С. Очерк метасоматических процессов. В сб.: Основ. пробл. в учении о магматог. рудных м-ниях. Изд-во АН СССР, 1953.
11. Леммлейн Г. Г. и Осадчев Б. Я. Вертикальное распределение в жиле бесцветных и дымчатых кристаллов кварца. ДАН СССР, 1945, т. 50.
12. Леммлейн Г. Г. и Клевцов П. В. Соотношение термодинамических параметров P-T-V для воды и 30%-водных растворов NaCl.— Зап. Всес. мин. об-ва, 1956, ч. 85, № 4.
13. Поярков В. Э. и Королев А. В. Некоторые особенности трещинных жил и вопросы их глубинных поисков.— Зап. Узб. отд. Всер. мин. об-ва, 1953, № 4.
14. Седлецкий И. Д. Коллоидно-дисперсная минералогия. Изд-во АН СССР, 1945.
15. Смирнов С. С. К вопросу о зональности рудных месторождений.— Изв. АН СССР, сер. геол., 1937, № 6.
16. Смольянинов Н. А. Флюоритовые месторождения Средней Азии.— Тр. Тадж.-Пам. эксп., 1935.
17. Уклонский А. С. Материалы для минералогии Туркестана. Бричмуллинское месторождение плавикового шпата.— Тр. Турк. научн. об-ва, т. I. 1923.
18. Уклонский А. С. Экскурсия в Чимган и Аурахмат.— Тр. III Всес. геол. съезда, 1928, вып. 2.
19. Хитаров Н. И. Экспериментальная характеристика устойчивости кварца и миграции кремнезема в гидротермальных условиях.— Тр. 4-го совещ. по эксперим. минералог. и петр. Изд-во АН СССР, 1953, вып. 2.
20. Moggey G. W., Ingerson E. The pneumatolitic and hydrothermal alteration and synthesis of silicates. Ec. Geol., 1937, vol. 37, suppl. to № 5.
21. Noll W. Die Mineralbildung von Sistem SiO₂—Al₂O—H₂O. Neues Jahrbuch für Mineralogie, 1935, Bd. 70.

Л. И. КОЛТУН

ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕЗИСА ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЛЕБЕДИНОЕ, ВЫЯВЛЕННЫЕ ПО ВКЛЮЧЕНИЯМ В МИНЕРАЛАХ

Для месторождения Лебединое характерны два основных типа рудных залежей: 1) метасоматические залежи и 2) жильные тела. Кроме того, выделяются вкрапленные руды в магматических породах (сиенитах, сиенит-порфирах и других) и скарновые зоны, которые, однако, практического значения не имеют.

Метасоматические рудные залежи представляют пластовые тела, приуроченные к доломитам кембрийского осадочного комплекса. Размер этих тел разнообразен как по площади, так и по мощности и зависит от интенсивности действия растворов, их состава, агрегатного состояния, температуры, а также определяется в значительной мере характером вмещающих осадочных пород, их пористостью, трещиноватостью, слоистостью и т. п. Как отмечают А. И. Фасталович и Н. В. Петровская (3), большинство метасоматических залежей имеет лентообразную форму и вытянуто в северо-восточном направлении, соответственно простиранию тектонических зон.

Метасоматические рудные залежи сложены анкеритом с частой вкрапленностью пирита. Пирит составляет иногда до одной четверти руды и обычно представлен неправильными зернами.

В сплошных анкеритовых массах встречаются маломощные жилки, состоящие из пирита, халькопирита, сфалерита, золота и других минералов.

К жильным рудным телам относятся преимущественно кварцевые жилы, содержащие в том или ином количестве рудные минералы, и кварцево-гематитовые жилы, а также некоторое количество мелких кальцитовых, доломитовых и анкеритовых жил, залегающих в основном в кембрийской осадочной толще и содержащих иногда довольно много сульфидов.

А. И. Фасталович и Н. В. Петровская выделяют на месторождении Лебединое четыре парагенетических ассоциации минералов: 1) пиритово-анкеритовую (для метасоматических залежей); 2) кварцево-пиритовую (для жильных рудных тел) с шестоватым кварцем, слагающим 80—90% общей массы жилы; 3) кварцево-полиметаллическую, представленную кварцем, пиритом, пирротином, сфалеритом, галено-висмутином, галенином, халькопиритом, тетраэдритом и борнитом; 4) гематитовую, содержащую гематит, чешуйчатую слюду, кварц.

Минеральные ассоциации приведены в порядке их выделения. Кварц,

как основной жильный минерал, присутствует во всех ассоциациях, отличаясь в каждой из них своими морфологическими признаками.

Ю. А. Билибин (1) связывал оруденение с проявлением гидротермального процесса, выделяя на месторождении два типа образований: 1) зоны окварцованных известняков, 2) кварцевые жилы и метасоматические залежи.

Более полная характеристика процесса рудообразования на месторождении дана А. И. Фасталовичем и Н. В. Петровской.

Источником растворов, по их мнению, явилась магма сиенитовых послепиритовых интрузий, что доказывается пространственным соотношением рудоносных жил и сиенито-порфировых массивов.

Процесс рудообразования подразделяется на ряд стадий, отделяющихся друг от друга внутриминерализационными подвижками:

1. Стадия образования пиритово-анкеритового агрегата и вкрапленности раннего пирита в сиенит-порфирах.

2. Стадия шестоватого кварца и метасоматического замещения известняков халцедоновидным агрегатом.

3. Стадия «рисового» кварца и основной массы сульфидов.

4. Стадия золота.

Включения минералообразующих растворов исследовались нами во всех прозрачных и полупрозрачных минералах.

В первую очередь рассмотрим включения в минералах метасоматических рудных залежей: в анкерите и халцедоновидном кварце, а затем в минералах жильных тел — в кварце, флюорите, кальците, сфалерите, анкерите и доломите.

Анкерит очень широко развит на месторождении. Он составляет около 30% рудной массы метасоматических залежей и является наиболее ранним образованием.

Для выявления минимальных температур и агрегатного состояния растворов, вызвавших замещение доломитизированных известняков анкеритом, мы исследовали включения маточных растворов.

Все включения в анкерите двухфазовые, жидкие, гомогенизирующиеся по первому типу (в жидкой фазе). Температура их гомогенизации колеблется в довольно широком диапазоне. Так, в мелкокристаллическом анкерите в одной из залежей обнаружены включения с температурой гомогенизации 360, 305 и 275°. Для образцов из центральной части залежи характерны также включения с температурой гомогенизации 260, 248, 232°. В образцах из других залежей гомогенизация включений происходит при 375—232°.

В одном из образцов пиритово-анкеритового агрегата, на контакте с участком незамещенного известняка, обнаружена тонкая, выклинивающаяся жилка, сложенная в краевых частях мелкокристаллическим желтоватым анкеритом. Центральная часть заполнена очень мелкими кубическими кристалликами пирита.

Образование таких жилок происходило, по-видимому, в результате отложения анкерита и пирита в мелких свободных трещинах или сильно пористых участках известняка. Кристаллики анкерита из этих жилок обладают ромбоэдрической формой и содержат большое количество двухфазовых жидких включений. В одном из кристалликов ярко выражены две зоны роста: внутренняя, серая, с массой очень мелких жидких включений и внешняя — прозрачная, содержащая небольшое количество включений. Включения внутренней зоны расположены параллельно зоне роста и гомогенизируются при 375—346° в жидкой фазе. Кроме того, обнаружены включения с температурой гомогенизации 340—328°, которые

являются вторичными для этой зоны и мнимовторичными по отношению к следующей зоне. Во внешней зоне гомогенизация включений происходит при 342—325°. Удлиненной стороной они расположены параллельно граням кристаллика. Таким образом, судя по температуре гомогенизации первичных включений в кристалликах анкерита, а также по включениям в зернах анкерита, можно с известной точностью судить о минимальной температуре образования сплошных анкеритовых масс.

Главный процесс замещения доломитизированных известняков анкеритом происходил при 375—325° в результате воздействия на эти породы гидротермальных растворов.

Жидкие включения с температурами гомогенизации 300—232° являются более поздними по отношению к основной массе анкерита.

Халцедоновидный кварц развит в доломитизированных и оолитовых известняках, реже в других породах и анкерите.

Его зерна расположены неравномерно. В одних участках они цементируют массу породы, в других, наоборот, встречаются лишь в виде единичных вкрапленников. Форма зерен неправильная, хотя часто встречаются псевдоморфозы ромбоэдрической формы по анкериту и доломиту.

По А. И. Фасталовичу и Н. В. Петровской, этот кварц является аналогом жильного шестоватого кварца, широко развитого в осадочных и особенно в интрузивных породах описываемого месторождения.

В тонких пластинках, изготовленных из халцедоновидного кварца, под микроскопом обнаруживается небольшое количество разнообразных включений. Среди них выделяются существенно газовые, двухфазовые — жидкие, сложные с жидкой углекислотой и трехфазные, с твердой фазой, без жидкой углекислоты.

Первичные и вторичные включения, вследствие отсутствия огранки в кварце, отчетливо разделять не удастся. Однако, если принять во внимание, что существенно-газовые включения, гомогенизирующиеся по второму типу, встречаются на месторождении только в этой разновидности кварца, то можно уверенно приписать им первичное происхождение. Температура гомогенизации существенно газовых включений колеблется в пределах 410—340°.

Жидкие включения очень разнообразны по температуре гомогенизации: 348, 340, 329, 324, 309, 291, 272, 258, 248, 244, 230, 202, 174, 149, 142° и отражают температуры последующих стадий минералообразования.

Большинство этих жидких включений, несомненно, имеет вторичное происхождение, но, возможно, некоторые из них, особенно с высокими температурами гомогенизации, являются первичными.

Трехфазовые включения (с твердой фазой) гомогенизировались при 206, 204, 190, 187°, причем твердая фаза исчезала несколько позже, чем газовый пузырек. Скорее всего, они являются вторичными.

Судя по включениям минералообразующих растворов, халцедоновидный кварц образовался вследствие метасоматического замещения карбонатных пород под действием первоначально газовых растворов. Процесс замещения, по-видимому, продолжался и в гидротермальной стадии.

Шестоватый кварц заполняет жилы в сиенитах и сиенит-порфирах, реже в осадочных породах кембрия и гранитах архея. В количественном отношении среди постмагматических образований он стоит на втором месте после анкерита и является более поздним.

В 5 км к юго-востоку от месторождения жилы шестоватого кварца, залегающие в сиенит-порфирах, ассоциируют с флюоритом, причем краевые части жил заполнены кварцем, а центральные — флюоритом.

Кристаллы шестоватого кварца переполнены большим количеством

включений. А. И. Фасталович и Н. В. Петровская отмечают, что в нем содержатся включения пылевидных веществ, а также жидкие включения и что распределение этих включений неравномерное, полосчатое, зональное. Внутренняя часть кристаллов обычно свободна от включений, наружные зоны, наоборот, переполнены ими.

При исследовании шестоватого кварца в пластинках обнаружены четыре разновидности включений, резко отличающиеся друг от друга: многофазовые, с большим количеством твердых фаз; многофазовые, с малым числом твердых фаз; двухфазовые жидкие, и сложные с углекислотой. При этом преобладают включения двухфазовые жидкие и включения с углекислотой.

Первичные включения четко отличаются от вторичных и строго приурочены к зонам роста кристалла. Явно первичными являются многофазовые включения с большим или малым содержанием твердых фаз. Первые из них встречаются только в центральных частях кристаллов, вторые — в средних и внешних зонах. В приповерхностных зонах в некоторых кристаллах первичными являются также двухфазовые жидкие включения.

Рассмотрим каждую из выделенных разновидностей включений, гомогенизирующихся по первому типу (в жидкой фазе).

В многофазовых включениях с большим количеством твердых фаз последние составляют около 30—45% объема, газовая фаза колеблется примерно в пределах 18—26%, а жидкая фаза меняется в зависимости от объема твердых фаз.

Твердые фазы, т. е. минералы-«узники» (2), по внешнему виду разнообразны. Наиболее распространены шестигранные, восьмиугольные и яйцевидные прозрачные кристаллики. Характерно, что в одном и том же включении может находиться несколько таких кристалликов, расположенных рядом или в разных уголках вакуоли. Встречаются также кристаллики кубической формы, по-видимому NaCl и KCl, коричневатые и желтоватые удлиненные, а также зернистый светлый или коричневатый агрегат минералов-«узников».

Интересно отметить, что восьми- и шестигранные минералы-«узники», характерные для включений этой группы, встречаются также в виде твердых включений-«спутников» в кристаллах кварца. Приурочены они к тем же зонам, в которых встречаются и многофазовые включения, содержащие аналогичные кристаллики-«узники».

При нагревании раньше всех растворяются кубические и затем восьми- и шестигранные кристаллики, после которых исчезает газовый пузырек.

Коричневатый зернистый минеральный агрегат растворяется в последнюю очередь при 360—490°, хотя иногда при нагревании не достигается его полного растворения и включение взрывается.

Многофазовые включения с малым содержанием твердых фаз характерны для средних и внешних зон шестоватого кварца, а также, как мы увидим ниже, для некоторой части кристаллов флюорита. Аналогичные включения встречались и в зернах халцедоновидного кварца.

При нагревании в микротермокамере гомогенизация их протекает плавно. Вначале при 120—160° исчезают кристаллики шести- или восьмигранной формы, затем одновременно вторая твердая фаза и газовый пузырек. Полная гомогенизация включений происходит при 300—255°.

Двухфазовые жидкие включения в большинстве случаев имеют явно вторичное происхождение и расположены в виде цепочек по залеченным трещинкам. Характерно, что многие из них имеют форму отри-

цательных кристаллов, а некоторые — трубчатую. Включения этой группы нередко являются первичными, характеризуют самую верхнюю — прозрачную зону роста и гомогенизируются в широком диапазоне температур от 240 до 145°.

Сложные включения с углекислотой, судя по расположению в кристаллах, являются вторичными. Соотношение фаз различно даже в одной и той же трещине.

При нагревании включения взрываются при различных температурах, начиная от 80° и кончая 320°. Включения с малым содержанием жидкой углекислоты, не превышающим 5—10% объема, гомогенизируются при температуре 230—180°.

Имеющиеся данные показывают, что шестоватый кварц образовался из гидротермальных растворов, первоначально имевших очень высокую концентрацию, о чем свидетельствуют многофазовые включения. По мере отложения кварца концентрация растворов и их температура несколько снижались. Процесс завершился действием слабонасыщенных растворов с температурой 225—160°.

Таким образом, предположения А. И. Фасталовича и Н. В. Петровской о том, что халцедоновидный кварц является аналогом кристаллов шестоватого кварца, не подтвердились. Под действием горячих газовых растворов проходило метасоматическое замещение кальцита, доломита и анкерита халцедоновидным кварцем. Из жидких растворов, сменивших пневматолитовые, происходило отложение шестоватого кварца в свободных трещинах и дальнейшее замещение карбонатных пород.

Флюорит нарастает непосредственно на дымчатом, ожелезненном шестоватом кварце. Он относительно беден включениями, но все же при просмотре большого количества образцов удалось проследить температурный режим растворов. В контакте с кварцем флюорит образует кристаллики, размером до 3—5 мм в поперечнике. По мере удаления от контакта кристаллы флюорита увеличиваются и в центральных частях жил их размеры достигают 2—2,5 см в диаметре.

Среди первичных включений в флюорите выделены две группы: многофазовые (с твердыми фазами) и двухфазовые жидкие; среди вторичных включений — двухфазовые жидкие и однофазовые жидкие.

В исследованных пластинках из кристаллов флюорита, залегающих непосредственно в контакте с шестоватым кварцем, обнаружены только многофазовые включения (первичные), гомогенизирующиеся при 290—220°; в более удаленных участках от контакта температура гомогенизации этих включений понижается до 250—185°, причем здесь обычно присутствует только одна твердая фаза, представленная шестигранным кристалликом-«узником».

В центральных частях жил многофазовых включений не найдено. Первичными здесь являются двухфазовые жидкие включения, гомогенизирующиеся при 200—120°.

Широко распространены мнимовторичные и вторичные двухфазовые жидкие и однофазовые жидкие включения. Гомогенизация двухфазовых мнимовторичных включений происходит в широком интервале температур от 200 до 50°.

Можно полагать, что флюорит образовался при температурах от 290 до 160° и ниже. Многофазовые включения с твердыми фазами свидетельствуют о том, что первоначально растворы были сильно концентрированными.

Образование ранних кристаллов флюорита происходило одновременно с выпадением шестоватого кварца, поэтому в обоих минералах встре-

чаются включения с аналогичными твердыми фазами и температурами гомогенизации. Однако флюорит кристаллизовался и после того, как прекратили свой рост кристаллы шестоватого кварца. Об этом говорят двухфазовые жидкие включения, гомогенизирующиеся при температурах от 180 до 50°, когда последние охлажденные порции растворов участвовали в залечивании трещин и минералообразования.

После шестоватого кварца и флюорита выделялся «рисовый» кварц. Он ассоциирует с пиритом, пирротинном, сфалеритом, галено-висмутом, галенитом, халькопиритом, а также с тетраэдритом и борнитом. Довольно часто вместе с ним встречается кальцит молочно-белого, иногда сероватого цвета, присутствие которого особенно характерно для жил, залегающих в кембрийских карбонатных породах.

Жилы, заполненные «рисовым» кварцем, обычно маломощны, со множеством ответвлений, и пересекают под углом жилы шестоватого кварца или, что бывает значительно реже, накладываются на них, образуя раздробленную брекчиевидную массу кварца и сульфидов.

В анкеритовых залежах аналогом «рисового» кварца является мелкокристаллический прозрачный кварц, ассоциирующий с пиритом, халькопиритом и другими сульфидами.

«Рисовый» кварц переполнен массой включений, однако все они не превышают 0,001—0,01 мм. Форма включений округлая, яйцевидная или неправильная.

Среди общей массы включений выделяются двухфазовые жидкие и сложные с углекислотой.

Замеры температуры их гомогенизации производились в образцах из разных участков месторождения. Температура гомогенизации жидких включений колеблется от 280 до 70°, причем включения с температурами ниже 140° являются явно вторичными.

Все включения с углекислотой, несомненно, вторичного происхождения и характеризуются различным соотношением фаз.

Таким образом, образование «рисового» кварца происходило, по-видимому, в интервале относительных температур 280—140°.

Поскольку «рисовый» кварц почти повсеместно ассоциирует с сульфидами, возможно решение вопроса о температуре образования последних. Непосредственно исследовать включения в самих сульфидах удалось только в цинковой обманке. Согласно предыдущим исследованиям, а также нашим данным, выделение цинковой обманки произошло после образования пирита II и пирротина.

Сфалерит (клеюфан), по сравнению с пиритом, галенитом и другими сульфидами распространен значительно реже. Он заполняет мелкие пустотки в «рисовом» кварце или встречается в виде вкрапленности в нем, образуя мелкие зерна неправильной формы в тесной ассоциации с галенитом и реже с халькопиритом и пиритом. Нами тщательно исследованы всего лишь два образца и произведено в них 17 замеров температуры гомогенизации.

Однако и это количество замеров оказалось достаточным для того, чтобы в общих чертах наметить относительный температурный интервал образования сфалерита.

Первичные включения характеризуются закругленными, яйцевидными, слабо удлинненными формами и гомогенизируются при 192—136°. Вторичные включения неправильные, угловатые, с массой пережимов гомогенизируются при 120—90°.

«Рисовый» кварц образовался при минимальной температуре 280—140°, а цинковая обманка, судя по жидким включениям, выпадала из растворов, имеющих минимальную температуру 192—136°. Поскольку

пирит и пирротин, как показывают исследования в рудных шлифках, выделялись раньше цинковой обманки, минимальная температура их образования должна быть несколько выше, чем 192°.

Минералы, образовавшиеся после цинковой обманки: халькопирит, галенит, тетраэдрит, борнит и другие, выпадали в то время, когда зализывались трещинки в сфалерите и в «рисовом» кварце при более низких температурах, порядка 130—120—90—70°.

Таким образом, на основании включений в «рисовом» кварце и цинковой обманке, зная порядок выделения отдельных сульфидов, мы могли наметить, правда приблизительно, температурный режим для большинства минералов этой стадии минерализации (табл. 1).

Таблица 1

Схема последовательности выделения минералов и температурный режим растворов в стадии «рисового» кварца и сульфидов

Стадия	Порядок выделения главных минералов	Температура растворов по включениям								
		270	240	210	180	150	120	90	60	30 °
Кварц («рисового») и сульфидов	Кварц («рисовый»)	—								
	Пирит II	—								
	Пирротин	—								
	Сфалерит	—								
	Галенит	—								
	Халькопирит	—								
	Тетраэдрит	—								
	Золото	—								
	Борнит	—								

После отложения «рисового» кварца и сульфидов произошли внутри-минерализационные подвижки. В результате этих подвижек возникли новые каналы, по которым начали циркулировать растворы, отложившие гематит и некоторое количество кварца и слюды.

По данным А. И. Фасталовича и Н. В. Петровской, кварцево-гематитовые жилы пересекают образования предыдущих стадий минерализации. В частности, мелкие гематитовые жилы пересекают метасоматические анкеритовые тела и являются секущими по отношению к жилам шестоватого кварца и кварцево-сульфидным.

По отношению к гематиту, количество кварца очень незначительно. Он встречается в зальбандах гематитовых жил и очень редко в виде хорошо ограненных мелких кристаллов в пустотах гематитовых жил.

Первичные включения в кварце зальбандов жил гомогенизируются при 305—245°, в то время как первичные включения кристаллов, находящихся в пустотах, гомогенизируются при 175—140°.

Температура вторичных включений в кварце зальбандов жил отвечает примерно температуре первичных включений в мелких кристаллах. В первом случае она равна 180—140°, во втором 175—140°.

Очевидно, залечивание ранних трещин в зернистом кварце с образованием в них вторичных включений и выпадение мелких кристаллов

кварца в пустотах с образованием первичных включений происходит взаимозависимо в процессе формирования кварцево-гематитовых жил.

Следовательно, мелкокристаллический кварц является эпигенетическим по отношению к гематиту и образовался позже него. Судя по температурам гомогенизации включений в нем, он вероятнее всего является одновременно кальциту последней стадии минерализации.

Жилы, заполненные *кальцитом*, встречаются исключительно в пределах развития кембрийских осадочных отложений, представленных различными карбонатными породами — известняками, доломитизированными известняками и доломитами. Совместно с кальцитом выделялись доломит, барит, а также пирит, сфалерит, галенит, халькопирит и другие минералы.

Рудные минералы сосредоточены чаще всего в зальбандах жил, реже в центральных их частях. При исследовании рудных минералов в приполюсках установлен следующий порядок их выделения: пирит, тетраэдрит, сфалерит, халькопирит, галенит.

Галенит, сфалерит и тетраэдрит отсутствуют в некоторых жилах, зато пирит и халькопирит присутствует всегда, хотя бы и в незначительном количестве.

Во всех образцах кальцита отмечены двухфазовые жидкие включения, гомогенизирующиеся по первому типу, и однофазовые жидкие.

Включения по форме резко разделяются на две группы, что характерно также и для *доломита*. К первой группе относятся включения с гладкими, закругленными очертаниями и с овальной или слабо удлиненной формой, а ко второй — уплощенные включения с резкими угловатыми очертаниями. Включения этой второй группы являются вторичными и мнимовторичными.

Первичные включения гомогенизируются от 165 до 60—55°. Вторичные включения в большинстве случаев — однофазовые жидкие. То же относится и к доломиту.

Таким образом, судя по включениям минералообразующих растворов, кальцит и доломит, а также сульфиды, выделившиеся совместно с ними, являются низкотемпературными гидротермальными образованиями.

При рассмотрении результатов термометрических исследований включений в минералах месторождения видно, что процесс рудообразования протекал на фоне изменения температуры растворов, а также их концентрации и состава.

По данным геолого-минералогических и термометрических исследований, на месторождении четко выделяются последовательные стадии минерализации (табл. 2). Каждая стадия отделяется от предыдущей внутриминерализационными подвижками, вызывавшими раздробление ранних рудных жил. При этом изменялись пути движения растворов и возникали новые трещины, заполняющиеся в дальнейшем минералами новых генераций.

Для описываемого месторождения процесс минералообразования связан в основном с действием гидротермальных растворов. Пневматолитиз выражен очень слабо и проявился только при образовании халцедоновидного кварца, метасоматически наложившегося на пирито-анкеритовые рудные залежи.

Интересно отметить, что пневматолитиз, выраженный стадией халцедоновидного кварца, следует не в самом начале процесса рудообразова-

ния, как это обычно бывает при формировании сложных полигенных месторождений, а после образования пиритово-анкеритовых залежей, когда произошли интенсивные тектонические подвижки.

Гидротермальный этап минералообразования во времени, таким образом, разделяется на два периода: ранний и поздний.

Ранний гидротермальный этап выражен одной стадией — анкерита и пирита. Под действием сильно железистых гидротермальных растворов, относительная температура которых понижалась от 375 до 325°, происходило замещение доломитизированных известняков и образование сплошных пиритово-анкеритовых масс.

Затем температура растворов повысилась и существенно снизилось давление вследствие образования новых и приоткрывания старых тектонических трещин. В результате кратковременно изменилось агрегатное состояние минералообразующих растворов. Газовые кремнеземистые растворы вызывали замещение анкеритовых рудных тел халцедоновидным кварцем.

Поздний гидротермальный этап разделяется новыми внутриминерализационными подвижками на четыре стадии, различающиеся по составу и температурам водных растворов: 1) шестоватого кварца и флюорита, 2) «рисового» кварца и сульфидов, 3) гематита и 4) кальцита и доломита.

В стадию «рисового» кварца и сульфидов отложилась основная масса сульфидов и золота. Необходимо отметить, что предыдущие исследователи (3) выделяли для месторождения отдельную стадию золота, следовавшую после выделения сульфидов и гематита, мотивируя это тем, что оно встречается во всех комплексах минералов.

Золото действительно находится в том или ином количестве в пиритово-анкеритовой, кварцево-флюоритовой, кварцево-сульфидной, кварцево-гематитовой и других ассоциациях, причем его распределение очень неравномерно.

На наш взгляд, самостоятельной стадии золота не существовало и оно выделялось в разных количествах, во всех стадиях гидротермального процесса.

Неравномерность распределения золота в разных жилах и разных участках месторождения, концентрация в одних и рассеяние его в других объясняются пересечением и скоплением разновозрастных жил, относящихся к разным стадиям минерализации, наложением процессов минерализации в одних и обособленностью минералообразования в других трещинах и жилах.

Связь описываемого месторождения с дериватами послееюрских сиенитовых интрузий доказана рядом исследователей (Ю. А. Билибиным, А. И. Фасталовичем и другими) и в настоящее время, по-видимому, не вызывает сомнений. Однако источник рудоносных растворов — активный магматический очаг — находился значительно глубже, чем выходящие теперь на поверхность интрузивные тела, не имеющие прямого отношения к оруденению и пересекаемые рудными жилами месторождения.

Этот факт подтверждается изучением включений в различных минералах из разных пунктов месторождения, удаленных на разные расстояния от интрузивных тел. Температуры гомогенизации включений в минералах отдельных стадий минерализации характеризуются постоянством для всей площади месторождения, независимо от состава вмещающих пород и близости интрузивов. Резких или даже постепенных изменений температуры в зависимости от удаления от интрузий не наблюдается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Билибин Ю. А. Петрография Алдана (последюрские интрузии). Изд-во АН СССР, 1941.
 2. Ермаков Н. П. Исследования минералообразующих растворов. Изд. Харьковск. ун-та, 1950.
 3. Фасталович А. И., Петровская Н. В. Характер оруденения Лебединого золоторудного месторождения (Алдан). — Сов. геология, 1940, № 2—3.
-

И. В. БАНЩИКОВА

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕЗИСА МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАРА-ОБА, ВЫЯВЛЕННЫЕ ПОСРЕДСТВОМ МИКРОТЕРМОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Жильные образования редкометального месторождения Кара-Оба в Центральном Казахстане весьма разнообразны по характеру их минерализации, морфологии и структурной позиции. Они подразделяются на ряд групп, отвечающих, по представлениям изучавших месторождение геологов, определенным этапам и стадиям формирования. Принятая на месторождении генетическая классификация жильных образований, по О. А. Синеву, такова:

1. Кварцево-топазовые жилы.
2. Высокотемпературные кварцевые жилы:
 - а) кварцево-касситеритовые жилы;
 - б) кварцево-молибденитовые жилы;
 - в) кварцево-вольфрамитовые жилы с касситеритом, молибденитом и висмутовыми минералами.
3. Среднетемпературные кварцево-вольфрамитовые жилы с сульфидами.
4. Низкотемпературные кварцевые жилы.
5. Кварцево-флюоритовые жилы и линзы.
6. Альбитовые прожилки.

Кроме того, среди высокотемпературных кварцево-вольфрамитовых жил выделяются шесть групп, заполняющих системы трещин различного направления. О. А. Синев считает, что образование их разорвано во времени, однако внутренние возрастные соотношения устанавливаются им совершенно условно.

Если выделение основных стадий формирования месторождения, за исключением отрицания самостоятельного генетического значения кварцево-топазовых жил, не вызывает разногласий у геологов, то подразделение стадий высокотемпературного жилобразования на отдельные ступени проводится ими по-разному. Мы имеем в виду главным образом группы высокотемпературных вольфрамоворудных жил и так называемые «кварцево-касситеритовые жилы», отличающиеся от вольфрамоворудных повышенным содержанием касситерита. Эти разногласия можно объяснить только тем, что не были найдены надежные критерии дробного подразделения.

Возможность получить объективные данные для выделения ступеней минерализации представляет микротермометрический метод, применение которого оказалось полезным при решении ряда сложных вопросов генезиса эндогенных месторождений.

Настоящая статья содержит результаты микротермометрических исследований кристаллов топаза, проведенных по трем группам жил в пределах стадии высокотемпературного жилобразования: группе кварцево-касситеритовых жил (жилы 88, 87 и другие) и двум группам кварцево-вольфрамитовых (жилы 21,26 и 1,10). Подходящими образцами топаза и других групп кварцево-вольфрамитовых жил мы не располагаем.

В исследованных кристаллах топаза выделяются три группы включений растворов: жидких двухфазовых, газовых и сложных (с углекислотой).

Двухфазовые жидкие включения минералообразующих растворов распространены больше всего. Они разнообразны морфологически и по соотношению фаз, но четко классифицируются по генетической позиции в кристаллах. Наиболее часто встречаются трубчатые и неправильные формы первичных жидких включений, расположенных по различным зонам роста кристаллов. Соотношения жидкой и газовой фаз меняются в них в соответствии с различными температурами гомогенизации, находящимися между 302 и 261°. Нередки также мнимовторичные включения, отвечающие тем же пределам температур гомогенизации, но расположенные по трещинкам, секущим соответствующие внутренние зоны кристаллов. Значительно реже распространены плоские или сложные неправильные формы вакуолей, расположенных в плоскости спайности кристаллов (001). Эти включения характеризуются температурой гомогенизации в пределах 342—305° или 240—220°. Такие температуры свойственны не только указанным включениям, но и расположенным по залеченным трещинкам, идущим из нарушенных зон кристаллов.

Газовые включения, содержащие около 36% жидкой фазы, гомогенизируются при 282—285° с точкой инверсии, которая на 32—35° ниже температуры гомогенизации включений.

Сложные включения с углекислотой содержат от 31 до 41% жидкой фазы и гомогенизируются при 278 и 298° также с точкой инверсии, которая ниже температуры гомогенизации на 20—40°.

Закономерности распределения включений в кристаллах удобнее рассматривать для каждой группы жил отдельно. Здесь следует оговориться, что по тем или иным причинам (разрушение внутренних частей кристаллов или отсутствие в них включений) самые внутренние части кристаллов охарактеризованы только для группы кварцево-касситеритовых жил. Поэтому наиболее полно мы можем представить рост кристаллов топаза из этой группы жил.

Группа касситеритовых жил (жилы 88, 77). Внутренние части кристаллов топаза жилы 88 содержат жидкие двухфазовые включения, гомогенизирующиеся при 305°. При движении к внешним частям кристаллов происходит постепенное равномерное снижение температур гомогенизации включений по зонам роста до 275°. Гомогенизация всех этих включений происходит по 1-му типу (в жидкой фазе), как это показано на кривых 2—4 (рис. 1).

Недалеко от наружных частей кристаллов по зоне роста располагаются сложные включения с углекислотой, содержащие 41% жидкости. Эти включения гомогенизируются при 299° по второму виду 2-го типа в газовой фазе (с точкой инверсии), характеризующемуся кривой 9. Здесь же присутствуют мнимовторичные включения — газовые, содержащие 36% жидкости, и сложные с углекислотой, содержащие 41 и 31% жидкости. Гомогенизация этих включений происходит также с точкой ин-

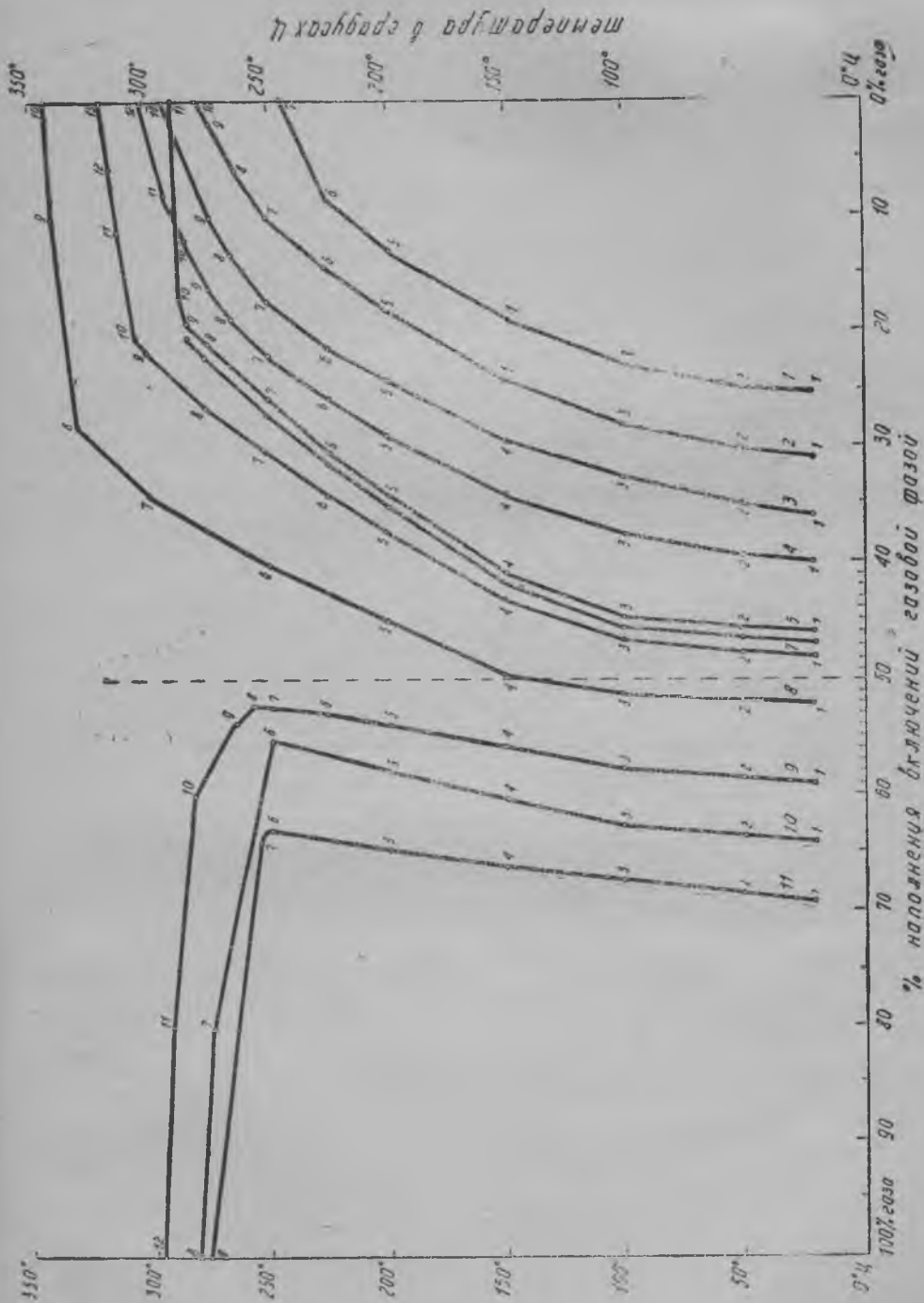


Рис. 1. Типы гомогенизации включений минералообразующей среды в топазах вольфрамородных жил месторождения Кара-Оба

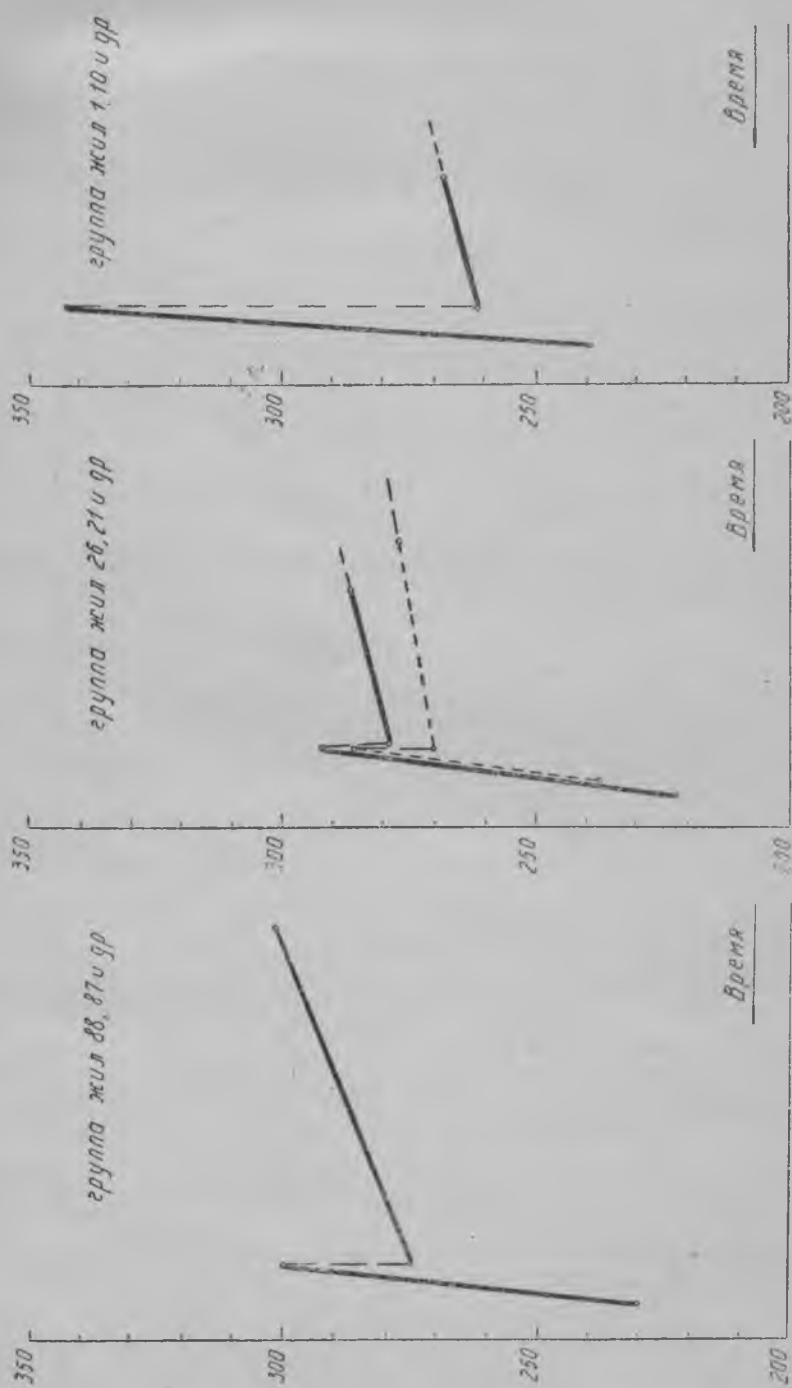


Рис. 2. Температурный режим растворов в процессе образования кристаллов галеза высокотемпературных вольфрамородных жил месторождений Кара-Оба

версии при температурах соответственно 282, 290 и 278°, ход которых представлен кривыми 10 и 11.

Вблизи поверхности кристаллов встречаются небольшие неправильные жидкие включения, гомогенизирующиеся при 250°, а также жидкие включения, расположенные по трещинкам, идущим из внешних зон, и плоские неправильные включения по спайности кристаллов с температурой гомогенизации 250, 239 и 230°. Гомогенизация этих включений происходит по 1-му типу, как показано на кривой 1.

I группа вольфрамоворудных жил (жилы 26, 21 и другие). Включений в центральных частях кристаллов топаза из жилы 26 не обнаружено.

Зоны средних частей кристаллов содержат жидкие двухфазовые включения с температурой гомогенизации, постепенно и равномерно снижающейся по направлению к периферии от 287 до 270°. Гомогенизация их происходит по 1-му типу, соответственно кривой 4.

В наружной части кристаллов расположена зона жидких двухфазовых включений с содержанием газа от 46 до 48%. Эти включения гомогенизируются с точкой инверсии в жидкой фазе или по третьему виду 2-го типа гомогенизации с критической точкой при 290—292°, как это изображено на кривых 5 и 6. Восстановление фазовой границы этих включений при охлаждении происходит со вскипанием. Во всех частях кристаллов встречаются жидкие двухфазовые включения по залеченным трещинкам, идущим из самых наружных зон, и неправильные включения, лежащие в плоскости спайности, с температурами гомогенизации 258—250° или 237—222°. Гомогенизация этих включений соответствует кривой 1.

II группа вольфрамоворудных жил (жилы 1, 10 и другие). Здесь исследованы включения главным образом внешних частей кристаллов. Зоны роста содержат жидкие двухфазовые включения с температурами гомогенизации, постепенно снижающимися от 268 до 261°. Гомогенизация происходит по 1-му типу и характеризуется кривой 3 и аналогичными ей, лежащими в той же области диаграммы.

Около поверхности кристаллов включения по зонам роста отсутствуют, но во всех других частях по плоскостям спайности расположены многочисленные группы небольших или сравнительно крупных удлиненных включений, содержащих от 46 до 52% газа. Они гомогенизируются с точкой инверсии в жидкой фазе при 342—320°, как это показано на кривых 7 и 8. В одной из пластин кристалла из жилы 1 обнаружено, что трубчатые включения с тем же соотношением фаз и температурой гомогенизации 330° прослеживаются по трещинке, начинающейся недалеко от наружной зоны роста кристалла и не пересекающей ее. Следовательно, генетически это мнимовторичные включения, характеризующие собой одну из последних зон роста. Кроме того, встречаются включения неправильной формы жидкие, расположенные по залеченным трещинкам и гомогенизирующиеся по 1-му типу при 239°.

Наличие в кристаллах достаточного количества зон роста, охарактеризованных включениями, дает возможность не только в общих чертах представить условия среды, в которой происходило формирование топаза, но и получить графики температурного режима растворов в процессе роста кристаллов по всем исследованным группам жил. Кривые гомогенизации, отражающие ход процесса гомогенизации разных групп включений, дают возможность уловить участие растворов различного агрегатного состояния в формировании топаза.

Как показали микротермометрические исследования, температурный

режим растворов в процессе образования кристаллов топаза аналогичен для всех трех исследованных групп высокотемпературных жил (рис. 2).

Рост внутренних частей кристаллов топаза происходил из гидротермальных растворов высокой плотности при минимальной температуре порядка $305\text{--}300^\circ$ (без учета поправки на давление, которое существовало в период минералообразования), при равномерном медленном снижении температуры растворов до $270\text{--}262^\circ$. Наружные зоны роста, содержащие газовые и наиболее высокотемпературные жидкие включения, относятся к поздней наложенной стадии повторного пневматолита, связанного с приоткрыванием каналов в результате новых тектонических подвижек.

Как показывают кривые хода гомогенизации включений, образование внешних зон кристаллов происходило как из флюидов малой плотности (до 69% газа при комнатной температуре), содержащих повышенные количества углекислоты (юго-восточный участок месторождения), так и из водных растворов (от 45 до 52% газа) на северном и центральном участках. Температура газовых растворов не может быть точно установлена по гомогенизации газовых включений внешних зон. Минимальные температуры водных растворов, соответствующие на определенных участках стадии повторного пневматолита, находились в пределах $342\text{--}285^\circ$. Стадия образования топаза при повторном пневматолите была, очевидно, очень непродолжительна, о чем можно судить по небольшому количеству минерального вещества, образовавшего наружные маломощные зоны кристаллов. Газовые растворы стадии повторного пневматолита, которые характеризуют собой резкое падение давлений, отвечающее возобновлению процесса трещинообразования, быстро охлаждались и трансформировались в жидкие водные растворы.

Таким образом, можно заключить, что формирование топазов исследованных нами жил происходило в два приема из растворов различного агрегатного состояния: 1) в раннюю стадию гидротермального этапа (около $305\text{--}260^\circ$) и 2) в позднюю стадию вторичного пневматолитового этапа (около 350°). Вторая стадия более кратковременна и изменчива, чем первая, и сменяется позднегидротермальной ступенью.

Такой своеобразный, но чрезвычайно характерный режим растворов в процессе роста наиболее ранних минералов жильного выполнения отвечает на вопрос о их внутренних возрастных взаимоотношениях и говорит об одновременности и идентичности условий образования различных групп вольфрамворудных и так называемых «касситеритовых» жил. Последние можно рассматривать лишь как несколько обогащенную касситеритом группу вольфрамворудных жил.

В. Е. ХАДЖИ, Г. М. САФРОНОВ

ВКЛЮЧЕНИЯ РАСТВОРА НА ГРАНИЦЕ ЗАТРАВКИ С НАРОСШИМИ СЛОЯМИ В ИСКУССТВЕННЫХ КРИСТАЛЛАХ КВАРЦА

При определении качества искусственных кристаллов кварца часто приходится сталкиваться с различными дефектами, сосредоточенными во внутренних зонах кристалла, главным образом вдоль границы раздела затравки с наросшим кварцем и в прилегающих слоях. Однородность кристалла в этих областях нарушается по следующим причинам.

1. Оседание посторонних примесей на поверхности затравки в начале роста, которые затем консервируются в виде твердых и жидких включений.

2. Образование в затравке или в ее внешней зоне включений маточного раствора.

3. Физическое различие материалов затравки и наросших зон.

В настоящей статье рассматриваются условия образования и морфолого-генетические особенности жидких включений, приуроченных к затравке. Последние довольно широко распространены в искусственном кварце. Хорошее срастание с незаметным для невооруженного глаза переходом от затравки к наросшему кварцу наблюдается сравнительно редко. Затравка почти всегда является дефектной зоной и в процессе разделки кристаллов подлежит удалению.

По ряду морфологических признаков, взаимной ориентировке и распределению в кристаллах рассматриваемая группа включений маточного раствора существенно отличается от всех других разновидностей жидких включений. Полости с раствором и газовой фазой имеют удлиненно-трубчатые, трубчатые, булавовидные, капиллярные, иглочатые и другие вытянутые в одном направлении формы. Вакуоли всегда полностью погружены в затравку, а их тонкие заостренные концы направлены внутрь кристалла. Замыкание всех вакуолей происходило почти одновременно, в результате чего утолщенные верхние концы лежат в одной плоскости. Газовая фаза находится на уровне поверхности затравки, располагаясь в утолщенной части полости. Размеры вакуолей по длинным осям изменяются от сотых долей до 0,5 мм. Преобладают полости удлиненной веретенообразной и каплевидной форм, размером от 0,1 до 0,3 мм. Коэффициент заполнения вакуолей жидкой фазой во всех включениях в одном кристалле остается постоянным и соответствует коэффициенту заполнения автоклава раствором перед опытом. Жидкая фаза занимает обычно 80% объема полости, газовая — 20%.

Продольные оси трубчатых включений ориентированы взаимно параллельно и располагаются под определенным углом к плоскости затравки. Угол наклона вакуолей изменяется в довольно широких пределах и зависит от ориентировки среза затравочной пластинки. В кристаллах, выращенных на затравках, параллельных базису, удлинение вакуолей перпендикулярно поверхности раздела затравочного и выросшего материала.

В отдельных кристаллах, вследствие появления массы трубчатых включений в начальной стадии роста, фиксируется рельеф поверхности затравки.

Наблюдаются случаи, когда капиллярные полости включений проникают затравку насквозь, в то время как основная часть включений располагается по периферии затравки. По одну сторону затравки вакуоли могут срастаться, образуя полости причудливых форм. Иногда веретенообразные вакуоли проникают в затравку так глубоко, что сливаются с вакуолями противоположной зоны. В таких случаях возникают V- и X-образные полости с общей газовой фазой. Слившиеся вакуоли иногда симметричны. Соединяющий их канал утончается в средней части общей полости (рис. 1). Газовая фаза может переходить в одну из сросшихся вакуолей, но отмечались случаи, когда при наличии связывающего канала она оставалась в двух противоположных концах капилляра. Отмечались явления расщепления тончайших связывающих каналов на цепочку микроскопических полостей.

Образование трубчатых вакуолей происходит в начале цикла кристаллизации. В период насыщения раствора в результате растворения затравок на их поверхности появляются конусовидные углубления, форма которых зависит от ориентировки среза затравки, степени однородности кристаллического вещества и продолжительности травления. С поступлением в зону роста пересыщенного раствора начинается отложение кварца на протравленных затравках. Конусы растворения сужаются, но глубина их остается неизменной. При относительно небольших скоростях роста кристалла углубления и капиллярные каналы быстро перекрываются. Происходит консервация маточного раствора.

Если при травлении затравки в ней появляются сквозные каналы, то возникают вакуоли, подобные изображенным на рис. 2. Крупные отверстия в затравке, даже при оптимальных условиях кристаллизации, зарастают медленно и оставляют в выросших слоях выклинивающиеся уплощенные трехгранные полости с раствором, которые иногда не успевают сомкнуться и выходят на поверхность кристалла в виде целых и трехгранных каналов.

При неоднократном дорастивании искусственных кристаллов кварца во внутренних областях возникают чередующиеся зоны включений. Мощность отдельных зон определяется продолжительностью травления кристалла перед очередным циклом наращивания. На рис. 2 изображен поперечный разрез кристалла, который трижды помещался в автоклав в качестве затравки. В двух первых краткосрочных циклах глубина растворения затравки была незначительной, что фиксируется относительно небольшими размерами вакуолей каплевидной формы. В последней зоне игольчатые вакуоли проникают в затравку на значительно большую глубину. Отчетливо проявляется закономерная ориентировка капилляров в пирамидах нарастания различных плоскостей.

Изучая характер растворения различных сортов кварца, нельзя не обратить внимания на тот факт, что затравки, изготовленные из природных и искусственных кристаллов, по-разному ведут себя при воздей-



Рис. 1. Включение раствора в двух веретенообразных вакуолях, соединяющихся тонким каналом в осевой части затравки. Газовая фаза расположена в правой части полости. Увеличение 120



Рис. 2. Чередующиеся зоны включений маточного раствора, возникшие при дорастании кристалла. Увеличение 80

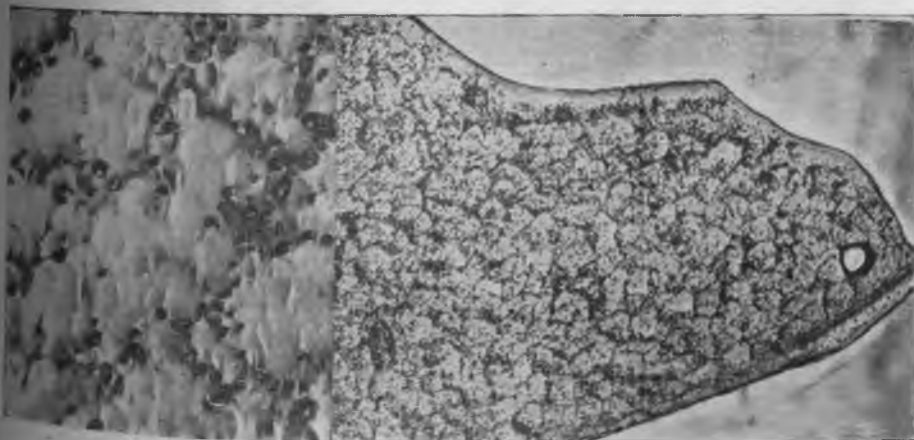


Рис. 3. Слева — затравочная пластинка, подвергшаяся избирательному травлению вдоль границ конусов нарастания аксессуарий поверхности базиса. Увеличение 2. Справа — участок поверхности затравки. Увеличение 40

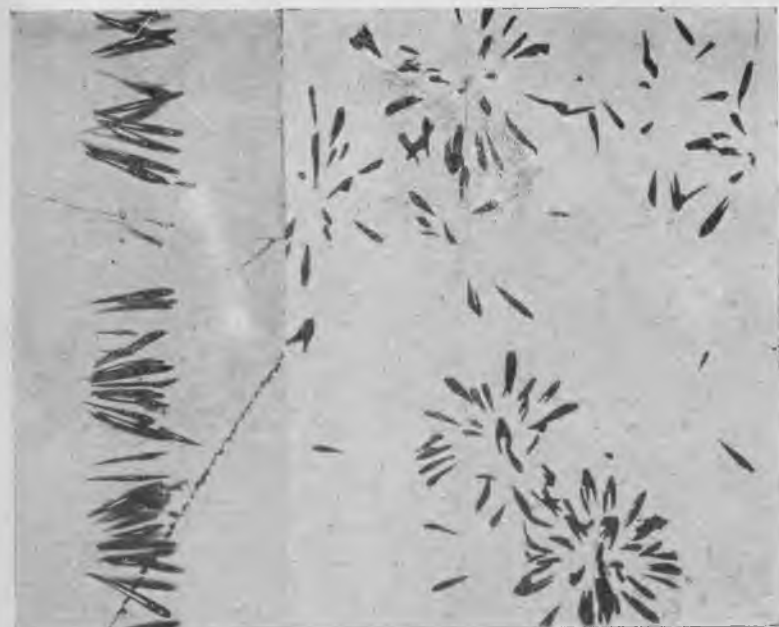


Рис. 4. Радиальное расположение вакуолей в затравке, изготовленной из кристалла искусственного кварца: *a* — плоскость снимка параллельна грани гексагональной призмы. Увеличение 120; *б* — плоскость снимка параллельна поверхности базиса. Увеличение 120

ствии на них агрессивной щелочной среды. При прочих равных условиях затравки из искусственного кварца обычно протравливаются сильнее, чем из естественного. Меньше всего подвержены травлению бездефектные монокристалльные пластины природного кварца. В случае появления в затравке трещин, двойниковых вростков, включений и других ослабленных участков, эти места растворяются в первую очередь. Протравленные области являются наиболее благоприятными для зарождения вакуолей. Из общей массы трубчатых полостей зоны травления их легко выделить благодаря приуроченности к определенным направлениям, совпадающим с плоскостями трещин и положением двойниковых швов. Иногда интенсивному травлению подвергаются целые участки затравки. В некоторых случаях растворение затравок бывает настолько сильным, что они обрушиваются с рамок на дно автоклава.

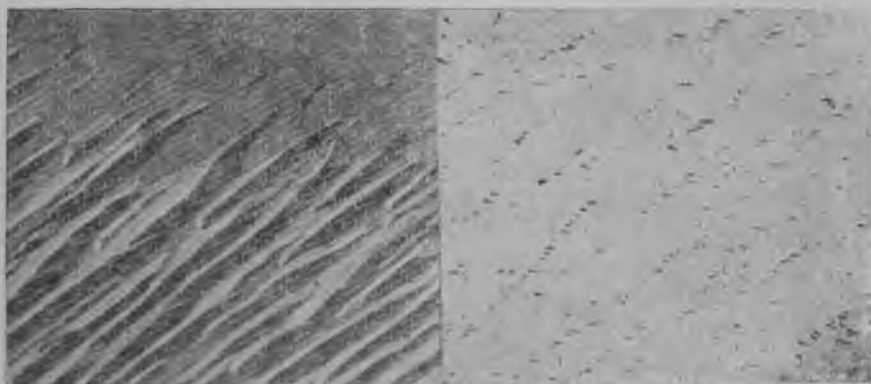


Рис. 5. Слева — скульптура поверхности кристалла, выращенного на затравке «косого среза» в зоне грани отрицательного ромбоэдра. Увеличение 32. Справа — закономерное распределение включений вдоль поверхности затравки в этом кристалле. Увеличение 20

Весьма своеобразные формы травления были обнаружены на затравках из искусственных кристаллов кварца, вырезанных параллельно поверхности базиса. На рис. 3, где изображена фотография одной из протравленных затравок (цикл был прерван), наблюдаются многочисленные фигуры растворения, которые густой сетью покрывают всю поверхность, за исключением узких краевых зон. Распределение воронок растворения на плоскости затравки в общих чертах подобно ориентировке включений в «сотовых» кварцах из пегматитов Волинских месторождений пьезокварца, с той лишь разницей, что в первом случае речь идет о двухмерной сетке, а во втором подразумевается ячеистый каркас, образованный сообществами газовых включений. Если рассматривать поверхность затравки при больших увеличениях, то можно заметить, что большинство воронок растворения частично огранено. Сквозные отверстия в затравке приобретают шестигранные очертания. Контуры их ограничений параллельны граням гексагональной призмы.

Причины закономерного травления затравок из искусственного кварца заключаются в следующем. Как было установлено, пирамида нарастания поверхности (0001), занимающая основную часть объема кристалла, состоит из большого числа субпараллельно ориентированных конусов нарастания аксессуарий (1). В определенных физико-химических условиях происходит отложение примеси на поверхности кристалла, которая консервируется в «паразитных» пирамидах роста. Размеры, формы и рас-

пределение участков с адсорбированной примесью в основных пирамидах нарастания зависят от строения поверхности кристалла. Поэтому в пирамиде базиса дефектные области с большим содержанием примеси сосредоточены главным образом в конусах нарастания акцессорий. Растворение затравок, предшествующее нарастанию кварца, протекает неравномерно.

Опыты по травлению кристаллов искусственного кварца в HF и наблюдения при выращивании кристаллов на затравках из искусственных кристаллов показали, что в первую очередь растворению подвергаются зоны с большим содержанием примеси. При растворении затравок, параллельных (0001), раствор диффундирует по каналам, уходящим в глубину кристалла радиальными пучками, направление которых совпадает с положением вышеупомянутых конусов в пирамиде нарастания базиса. Регенерация подобных затравок сопровождается образованием многочисленных булавообразных вакуолей с маточным раствором, которые веерообразными пучками-«кустами» распределяются вдоль границы затравки с нарощим кварцем. Один из случаев радиальной ориентировки полостей с раствором иллюстрируется на рис. 4.

При изготовлении из одного и того же кристалла затравок, параллельных базису, положение вакуолей относительно поверхности затравки будет зависеть от удаления плоскости среза от затравки. По мере перемещения из наружных областей кристалла к внутренним зонам сеть фигур травления на затравках должна сгущаться. Области сравнительно однородных пирамид нарастания граней положительного и отрицательного ромбоэдров растворяются с поверхности постепенно (рис. 5) и при нарастании затравки не содержат включений раствора.

Другим, не менее наглядным, примером, подтверждающим выказанные положения, могут служить случаи взаимно параллельного размещения вакуолей в кристаллах, которые были получены на затравках, ориентированных под небольшими углами к грани отрицательного ромбоэдра (так называемых «косых срезах» в зоне отрицательного ромбоэдра). Удлиненная форма «паразитных пирамид» — коллекторов примеси, образующихся при регенерации ребристой поверхности «косого среза», определяет только общую ориентировку рядов, в которые сгруппированы вакуоли. В пределах каждого ряда в одной плоскости наблюдаются иногда незначительные ($10\text{--}20^\circ$) отклонения длинных осей вакуолей с образованием слившихся полостей.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что закономерная ориентировка каналов, возникающих при растворении кристаллического вещества, зафиксированная положением вакуолей с маточным раствором, позволяет уточнить некоторые детали внутренней морфологии кристаллов искусственного кварца.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сафронов Г. М., Хаджи В. Е. Термометрические исследования жидких включений в искусственном кварце. — Тр. ВНИИП, 1957, т. I, вып. 2.

В. А. КАЛЮЖНЫЙ

К ВОПРОСУ О ГЕРМЕТИЧНОСТИ ЖИДКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ

Все основные предпосылки метода гомогенизации так или иначе опираются на предположение о полной непроницаемости материала кристалла для жидкостей и газа как в термодинамических условиях земной коры, так и при искусственном восстановлении гомогенного состояния включений путем нагревания. Естественно возникает вопрос о надежности герметизации включений и, в частности, о степени проницаемости кристалла для жидкого или газового раствора в зависимости от температуры и перепада давлений. Подобные вопросы обсуждались в прошлом главным образом на основе визуального наблюдения над включениями (1). В настоящее время опубликованы новые экспериментальные материалы, как подтверждающие непроницаемость кристаллов (5), так и отрицающие ее (7). В связи с этим мы также предприняли некоторые опыты для проверки герметичности включений.

Обычно процесс гидротермальной кристаллизации происходит в условиях высоких температур и давлений с постепенным их спадом, вследствие чего расположение первичных включений от центра к периферии кристалла почти всегда отвечает нормальному ходу изменений температур от высоких к более низким. Следовательно, включения, расположенные у основания и в центре кристалла, должны иметь наполнение меньшее, чем включения, находящиеся у граней кристалла. Если допустить возможность миграции раствора, то закономерность наполнения включений от центра к периферии кристалла должна быть нарушена. Однако это почти не наблюдается в действительности.

Часто во внешних зонах головок кристаллов сохраняются однофазовые жидкие включения, несмотря на то, что минералы на протяжении миллионов лет находились в свободных занорышах или миаролах (1). К тому же очень часто содержимое включений уже при комнатной температуре находится под значительным давлением. Например, вскрытие в глицерине при 25° двухфазовых газовой-жидких включений в морионе из Вольны показало увеличение общего объема примерно в 100 раз (2), т. е. в таких условиях внутреннее давление во включении достигало 100 атм. Нередко во внешних зонах кристалла находятся включения с жидкой углекислотой, наполнение которых достигает почти 100%. Давление внутри таких включений в поверхностных условиях также могло достигать значительной величины. Однако, несмотря на огромный промежуток времени существования этих включений, они сохранили внутреннее давление и первоначальное наполнение. Подобные факты, очевидно, свидетельствуют о непроницаемости кристаллической решетки в условиях

земной коры для таких минералов, как кварц, топаз, кальцит, флюорит и многие другие.

Экспериментальные исследования проницаемости кристаллов довольно малочисленны. Гораздо больше данных о поведении различных твердых материалов в условиях очень высокого перепада давлений. Например, известно, что вода, спирт и эфир проникают в стекло и плавленый кварц при комнатной температуре и давлениях, превышающих 15000 атм. Нефть и глицерин при тех же условиях не обнаруживают такого свойства (6).

Показателем проникновения жидкости через кристалл во включение (или из включения) обычно служит температура гомогенизации, которая очень чувствительна к изменениям общего удельного объема содержимого вакуоли. Используются при этом две возможности.

1. Путем перегрева жидких включений (под перегревом мы понимаем превышение температуры нагрева над температурой гомогенизации) создается значительное превышение давления во включении над внешним. В случае миграции раствора из включения, температура гомогенизации в повторном опыте должна несколько повыситься в результате увеличения удельного объема жидкости при данной температуре.

2. Наоборот, помещая в автоклаве кристалл с жидкими включениями и создавая большое внешнее (по отношению к кристаллу) давление воды, можно стимулировать проникновение ее через кристалл извне, что уменьшит удельный объем включения и, следовательно, понизит температуру гомогенизации. Опыты следует вести по возможности длительное время, приближая процесс к естественному.

Однако первая возможность исследования герметичности включений не всегда может дать однозначное решение вопроса. Дело в том, что повышение температуры гомогенизации может вызываться не только миграцией раствора через решетку. Такой же результат получается при возникновении мельчайших трещинок вокруг вакуолей и частичном выжимании раствора в них (1,3). Особенно это характерно для кристаллов с совершенной спайностью. Несомненным доказательством отсутствия воздействия всех перечисленных факторов является только неизменность температуры гомогенизации до и после опыта. Постановка опытов в автоклаве отличается от вышеописанной несравненно большей надежностью результатов, так как включения не только не перегреваются, но и далеко не достигают температуры гомогенизации.

Сведения о миграции воды через кристалл кварца впервые были опубликованы Скиннером (7). Включения, выдерживаемые в термокамере на протяжении 3, 20 и 110 часов соответственно при 122, 128 и 121°, что выше температур гомогенизации на 17—34°, после опыта заполнялись жидкой фазой при температурах в среднем на 12—15° выше первоначальных температур гомогенизации. По автору, это было следствием утечки раствора из включений.

Согласно опытам, проведенным в автоклаве, жидкие включения в кварце после 24- и 60-часовой выдержки при 70° и давлении 600 и 850 бар снижали температуры гомогенизации на 15—16° (табл. 1). По мнению автора, это было результатом проникновения воды во включения извне через кристалл кварца.

Годом позже была опубликована статья Рихтера и Ингерсона (5), в которой авторы сообщали о результатах нагревания и длительной выдержки включений в термокамере при t° на 20, 25 и 30° выше температуры гомогенизации. После опытов, которые продолжались 3 и 6 часов, включения показывали предыдущие температуры гомогенизации и, следовательно, сохраняли свое начальное наполнение. Авторы, полемизируя со

Таблица 1

Наибольш. диаметр вакуоли, мм	Т° гомогенизации перед опытом	Давление в автоклаве, бары	Продолжительность опыта, часы	Т° гомогенизации после опыта	Разность температур гомогенизации
1,25	90	850	60	81	9
1,20	108			92	16
1,00	109			94	15
1,00	101			86	15
0,75	107			90	17
0,75	97			81	16
0,75	93			83	10
0,50	97			85	12
0,40	101			87	14
0,25	106			99	7
1,20	110	600	24	102	8
1,00	111			106	5
0,75	96			91	5
0,75	95			90	5
0,40	108			102	6
0,30	108			100	8

Скиннером, считают также невозможным в обычных геологических условиях достижение значительной разности давлений внутри включений и вне кристалла, находящегося в занорыше.

Вследствие дискуссионности приведенных выше данных Скиннера, мы попытались повторить его исследования. Для измерения температур гомогенизации использовалась термокамера новой конструкции с контактным обогревом препарата в сочетании с регулирующим милливольтметром МРЩПр-54. Такая установка позволяла вести измерения с точностью $\pm 1-2^\circ$.

Многофазовые включения в топазе при вскрывании их в глицерине увеличивают начальный объем газового пузырька в несколько десятков раз. Это указывает на значительное внутреннее давление в них при комнатной температуре за счет газовых компонентов. Два из таких включений, расположенных в одном поле зрения микроскопа (см. рис. 1), выдерживались на протяжении 23 суток в нагретом состоянии при температуре, колеблющейся от 365 до 380° .

Включение большого размера (а) уже в первые часы нагревания имело температуру гомогенизации жидкой фазы 382° . На протяжении двух недель эта температура выдерживалась без изменений, после чего температура гомогенизации этого включения повысилась на $4-5^\circ$ и в дальнейшем оставалась неизменной на протяжении остальных 9 суток. Никаких изменений формы полости включений не было замечено.

Второе включение (б), по своим размерам приблизительно в три раза меньше первого, гомогенизировалось в начале проведения эксперимента в жидкую фазу при 342° . Вследствие того, что температура нагревания выдерживалась по точке гомогенизации первого включения, второе все время находилось в перегретом состоянии (на $25-40^\circ$). Вероятно, при таком перегреве внутреннее давление в несколько раз превышало рассчитанное согласно РТ-зависимости, например, для 30-процентного раствора

NaCl — 480 атм (4). Однако, несмотря на такое неравновесное состояние, температура гомогенизации в течение 23 суток осталась прежней, равной $342 \pm 1^\circ$. Форма включения при этом также не изменилась.

Результаты произведенного опыта показывают неизменность общего удельного объема содержимого включений при нагревании на протяжении 14 и 23 суток. Поведение первого включения, очевидно, может свидетельствовать о каких-то незначительных изменениях в объеме включения аномального характера. Возможно, это связано с частичным выжиманием раствора в микротрещинки, для возникновения которых в крупном включении имеется намного больше шансов.



Рис. 1. Многофазовые включения в топазе (Волянь). Увеличение 150

Для исследования герметичности включений под действием внешнего давления нами использовалась аппаратура Лаборатории горючих ископаемых Института геологии полезных ископаемых АН УССР. Необходимое давление воды на препарат с включениями создавалось нагреванием автоклава, наполненного водой примерно на 100%. Затвор автоклава, действующий по принципу некомпенсированной площади, охлаждался проточной водой, что обеспечивало полную герметичность прибора. Измерение давления производилось с помощью пружинного манометра системы Бурдона.

В результате исследований оказалось, что включения во всех кварцевых препаратах, помещенных в автоклав и выдержанных на протяжении 90 часов при $150-160^\circ$ и давлении $830-880 \text{ кг/см}^2$, не изменили начального наполнения. Температуры гомогенизации включений до опыта и после его проведения остались неизменными, что свидетельствует о непроницаемости кварца в данных условиях (табл. 2).

По нашему мнению, ошибочные результаты Скиннера получены вследствие неточного измерения температур гомогенизации. Судя по схематическому рисунку нагревательного столика, приведенного в его работе, влияние внешней более низкой температуры на верхние слои силикатной жидкости (среды для обогрева пластинок кварца) и спай термопары очень значительно, вследствие большой поверхности охлаждения стеклянной «ниши», предназначенной для микроскопического наблюдения.

Таблица 2

№ включений	Месторождение и его тип	Т° гомогенизации перед опытом	Условия опыта			Т° гомогенизации после опыта
			t°	давление, кг/см ²	время, часы	
1	Бристеншток (Альпы)—горный хрусталь	190				190
2	"	191				191
3	Синтетический кварц	305				305
4	Вольнь—пегматит, морион	250	150—160	830—880	90	250
5	"	245				245
6	"	234				234
7	Вольнь—пегматит, морион	231				231

Приведенные выше данные, вероятно, могут служить доказательством в пользу непроницаемости для воды большинства минералов. Исключение составляют цеолиты, структурное строение которых характеризуется наличием сквозных каналов, где свободно могут перемещаться молекулы посторонних веществ. Возможно, ненадежной следует считать герметизацию включений, расположенных в плоскостях индукционных граней, двойниковых швов и т. д., т. е. в местах нарушения ориентировки кристаллической решетки и неполного совпадения структурных единиц ее. Однако этот вопрос требует специального исследования. Полученные выше экспериментальные данные также могут восприниматься как недостаточные. Чтобы избавиться от каких-либо сомнений в непроницаемости кристаллической решетки, следует наряду с теоретическими обоснованиями, исходящими из закономерностей связей в решетке, произвести аналогичные вышеописанным опыты с большим количеством минералов при условиях, максимально приближающихся к обстановке гидротермального и пневматолитового минералообразования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ермаков Н. П. Исследования минералообразующих растворов. Изд. Харьковск. ун-та, 1950.
2. Калюжный В. А. Жидкие включения в минералах как геологический барометр.—Минералог. сб. Львов. геол. об-ва, 1955, № 9.
3. Леммлейн Г. Г., Клия М. О. Изменения жидких включений под влиянием временного перегрева кристалла.—ДАН СССР, 1954, т. 94, № 2.
4. Леммлейн Г. Г., Клевцов П. В. Соотношения термодинамических параметров Р-Т-V для воды и 30%-х водных растворов NaCl.—Зап. Всес. мин. об-ва, 1956, ч. 85, № 4.
5. Richter D. H., Ingerson E. Some considerations regarding liquid inclusions as geologic thermometers.—Econ. geol., 1954, vol. 49, № 7.
6. Poulter T. C., Wilson R. O. The permeability of glass and fused quartz to ether, alcohol and water at high pressure.—Phys. Rev., 1932, ser. 2, vol. 40.
7. Skinner B. J. Some considerations regarding liquid inclusions as geologic thermometers.—Econ. geol., 1953, vol. 48, № 7.

И. Н. МАСЛОВА

ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВКЛЮЧЕНИЙ ВО ФЛЮОРИТЕ УЛЬТРАМИКРОМЕТОДОМ

Для исследования химического состава жидких включений в минералах, который ранее определялся главным образом спектроскопически и методом водных вытяжек, нами впервые был применен метод ультрамикрхимического анализа. Этот метод, основанный на аналитических принципах микроанализа, но существенно отличающийся от него техникой проведения работ, позволяет анализировать очень малые количества вещества (1γ) из очень малых объемов раствора (1λ).

Главным оснащением при данном методе является биологический микроскоп с микроманипуляторами, посредством которых осуществляется перемещение большей части аппаратуры (рис.). Основные операции выполняются на столике микроскопа. Перенос жидкости осуществляется посредством так называемого поршневого приспособления, которое состоит из микропипетки и поршневого устройства. Реакционными сосудами служат короткие конусообразные капилляры.

Ультрамикрометодом (1, 2) можно определить химический состав непосредственно самой жидкой фазы включений. Первые наши экспериментальные исследования проводились с такими включениями во флюоритах камерных пегматитов месторождения Керемет-Тас¹.

В периферийных зонах кристалла флюорита преобладают тончайшие трубчатые включения, ориентированные нормально к граням кристаллов. Ближе к центральному частям в бесцветном флюорите наблюдаются более крупные включения растворов (от сотых до десятых долей миллиметра) и в редких случаях — макровключения размерами в несколько миллиметров.

Исследованию подвергались не трубчатые включения периферийной зоны, а более крупные, расположенные ближе к центральным частям. В этих включениях жидкая фаза занимала 90—96%, а газовая соответственно 10—4%. Вскрытие таких жидких включений проводилось на столике микроскопа путем их раздавливания с помощью двух линз (плосковыпуклой и плосковогнутой), которые могут сближаться и раздвигаться (рис.). В основу этого способа было положено вскрытие газовых пузырей в стекле, предложенное В. Т. Славянским (5). Для этого необходимо из куска минерала, содержащего включения, приготовить препарат толщиной около 1 мм и площадью 2—4 мм². Такой препарат свободно по-

¹ Флюориты с жидкими включениями микроскопических размеров были предоставлены для эксперимента Н. П. Ермаковым.

мещается в поле зрения микроскопа, и включение, окруженное возможно меньшим количеством вмещающего минерала, легко вскрывается. Если включение имело в диаметре десятые доли миллиметра, то при раздавливании препарата раскол его шел чаще всего по линии расположения включения; это облегчало извлечение из него раствора. Препараты с включениями размером в сотые доли миллиметра при раздавливании раскалывались на множество мелких кусочков, что затрудняло процесс извлечения раствора из них. Извлекался раствор из включений путем



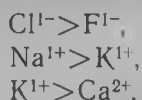
Рис. Микроскоп с микроманипуляторами

промывки вскрытой вакуоли бидистиллятом (промывание вакуоли осуществлялось при помощи поршневого приспособления). Для получения раствора нужной концентрации и объема ($0,001$ — $0,01$ мм³) вскрывалось несколько включений. Нужная концентрация определялась опытным путем в зависимости от содержания компонента в растворе (раздавливалось от 16 до 32 препаратов).

Применяя технические приемы ультрамикрометода и используя специфические реакции, известные в аналитической химии, мы исследовали состав полученных таким образом растворов. Качественные реакции показали большое содержание в этих растворах ионов Na^+ , K^+ , Cl^- и малые количества ионов Ca^{2+} и F^- .

Кроме химического состава растворов включений микроскопических размеров, для контрольного анализа был определен качественный состав раствора включения длиной в 5 и шириной в 2 мм. Жидкая фаза занимала в нем 69%, а газовая — 31%. Это макровключение вскрывалось посредством сверла диаметром в 1 мм. Было извлечено при этом $0,03$ мм³ раствора. Качественный анализ раствора показал присутствие в нем ионов Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Cl^- , F^- и отсутствие ионов Mg^{2+} , Al^{3+} , Fe^{3+} , SO_4^{2+} , CO_3^{2-} , PO_4^{3-} ; pH раствора оказалось равным 4. Установлены большие концентрации ионов Na^+ , K^+ , Cl^- и небольшие концентрации иона

Ca^{2+} и в виде следов ион F^{1-} . Количественные соотношения обнаруженных ионов оцениваются следующим образом:



Предполагаемые химические соединения: NaF , NaCl , KCl , CaCl_2 .

Известно (3) что в газовой фазе могут присутствовать сильные кислоты (HF , HCl , H_2S , CO_2). Такой состав ее мог обусловить образование кислой среды в исследуемом растворе. Влияние CO_2 на величину концентрации водородных ионов в газовой-жидких включениях было экспериментально доказано В. А. Калюжным (4).

Химический состав жидких включений флюоритов этого же месторождения был определен во ВСЕГЕИ (по устному сообщению А. И. Захарченко) методом водных вытяжек. Им были обнаружены ионы Na^{1+} , K^{1+} , Cl^{1-} , F^{1-} . Количественные соотношения этих ионов оказались такими: Cl^{1-} , почти в полтора раза больше ионов F^{1-} . $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^{1+} + \text{K}^{1+}$. Солевой состав предполагается таким (в мг на 100 г образца): $\text{KCl} = 0,1$, $\text{NaCl} = 4,2$, $\text{CaF}_2 = 5,2$, $\text{MgCl}_2 = 0,9$, $\text{CaCl}_2 = 1,4$.

Сопоставление полученных нами результатов с данными А. И. Захарченко показало почти полное совпадение химического состава растворов и несоответствие количественных соотношений обнаруженных в них ионов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алимарин И. П., Петрикова М. Н. Ультрамикрoанализ.—Природа, 1955, № 1.
2. Бенедетти-Пихлер А. Техника неорганического микроанализа. Изд-во ин. лит-ры, 1951.
3. Ермаков Н. П. Исследования минералообразующих растворов. Изд. Харьковск. ун-та, 1950.
4. Калюжный В. А. К результатам определения рН растворов жидких включений. — Геохимия, 1957, № 1.
5. Славянский В. Т. Метод анализа газа в пузырьках диаметром меньше 0,2 мм.—Стекло и керамика. 1953, № 11.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Г. М. САФРОНОВ

КСЕНОГЕННЫЕ И ИСКУССТВЕННЫЕ ЖИДКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В СИНТЕТИЧЕСКОМ КВАРЦЕ

В синтетическом кварце встречена своеобразная группа ксеногенных включений битуминозных веществ, которые были сконцентрированы в удлиненных полостях, расположенных над затравкой, преимущественно с одной стороны кристалла. При комнатной температуре во включениях наблюдались три фазы: газ (20—29% и более), маточный раствор (0—5—15%) и битуминозное вещество светло-коричневого цвета, по консистенции (до 60—80%) напоминающее густое масло.

Включения имеют грушевидную и конусовидную форму (рис. 1).

Основания конусов расположены на поверхности затравки. В кристаллах, выращенных на затравках, параллельных базису, удлинение включений совпадает с направлением оси L_3 . Размеры включений по длинной оси достигают 1—2 мм. В утонченной части включений, где находится маточный раствор, полость постепенно выклинивается. Иногда на продолжении таких полостей крупных трехфазовых включений наблюдается цепочка мелких капилляров двухфазовых включений, в которых жидкая фаза представлена кварцобразующим раствором или битуминозным веществом.

В отдельных включениях присутствуют очень мелкие частицы твердой фазы, которые плавают в битуминозном веществе, сосредоточиваясь в верхних частях полости. Газовая фаза в таких случаях всегда находится в вязком битуминозном веществе и обособливается в двух-трех пузырьках.

В некоторых чисто ксеногенных включениях, при полном отсутствии маточного раствора, наблюдалось очень большое количество газовой фазы, занимающей свыше 80% объема полости, а остальные 20% представляли собой жидкие нефтепродукты.

Искусственно введенные в кварцобразующий раствор битумы образовали при повышении температуры своеобразную эмульсию. В начале цикла на поверхности затравки эти битумы прилипали в виде многочисленных мелких капель.

Сравнительно быстро растущий кристалл консервировал их или совместно с кварцобразующим раствором, или же в чистом виде. Размеры и форма вакуолей ксеногенных включений свидетельствуют о том, что начальный диаметр прилипшей капли битума постепенно уменьшался в процессе ее замыкания. Нарастающие слои при перемещении фронта грани постепенно уменьшали исходный диаметр, образуя конусовидные включения. Учитывая характер температурной зависимости поверхностно-

го натяжения, можно было бы ожидать, что капли жидких нефтепродуктов в условиях высоких температур растекутся на поверхности затравки, образовав при этом тонкую пленку. Такая пленка могла бы блокировать поверхность кристалла и существенно затруднять его рост. В действительности на плоскости (0001) растущего кристалла капли нефти оказываются рассредоточенными и группируются лишь на определенных участках.

Образование изолированных полостей включений с нефтепродуктами зависит, по-видимому, от термодинамических условий в автоклаве, концентрации раствора и скорости

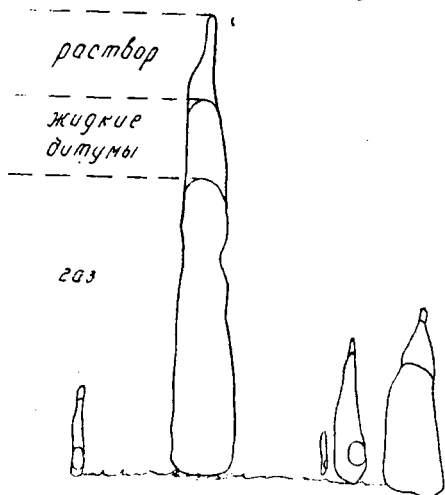


Рис. 1. Форма ксеногенных включений в искусственном кварце

при перемещении фронта граней. Обычно ксеногенные включения своим расположением на поверхности (0001) фиксируют границы между акцессориями.

Большинство спорадически встречающихся включений возникает чаще всего в местах нарушения однородности кристаллической решетки. Одним из доказательств этого служит нахождение довольно крупных (до 2 мм по длинной оси), уплощенных ксеногенных включений между субиндивидами унаследованного дофинейского двойника в нарощенном слое кварца.

При удалении от плоскости затравки в нарастающем слое кристалла кварца сложные ксеногенные включения часто сменяются двухфазовыми включениями маточного раствора, с нормальными соотношениями фаз газ—жидкость, отвечающими коэффициенту заполнения автоклава (рис. 2).

Наряду с обычными затравками, в автоклав помещались кристаллы и отдельные блоки кристаллов кварца с высверленными с помощью ультразвуковой установки отверстиями. По мере нарастания граней кристалла кварца происходило одновременно и зарастание цилиндрической полости, которая постепенно сужалась за счет отложения SiO_2 на ее стенках. Ее зарастание происходило неравномерно. С приближением к омывающейся раствором наружной поверхности грани толщина нарощенного на внутренней стенке слоя искусственного кварца увеличивается. В глубине полости такое отложение не наблюдается, и сохраняются даже царапины и борозды, возникшие при сверлении кварца. Это указывает на относительно слабую диффузию концентрированного раствора в полостях небольших диаметров.

продвижения поверхности кристалла во время роста. Пережимы и утонченные участки вакуолей формировались в периоды наиболее высоких скоростей роста кристалла, а раздувы соответствовали замедлению в его росте. Часто включения нефтепродуктов встречаются в зонах скелетного роста вместе с двухфазовыми включениями раствора.

Ориентировка вакуолей контролируется вначале морфологией макрорельефа затравки и растущих граней. Характер их поверхности в значительной степени определяет место формирования капилляров

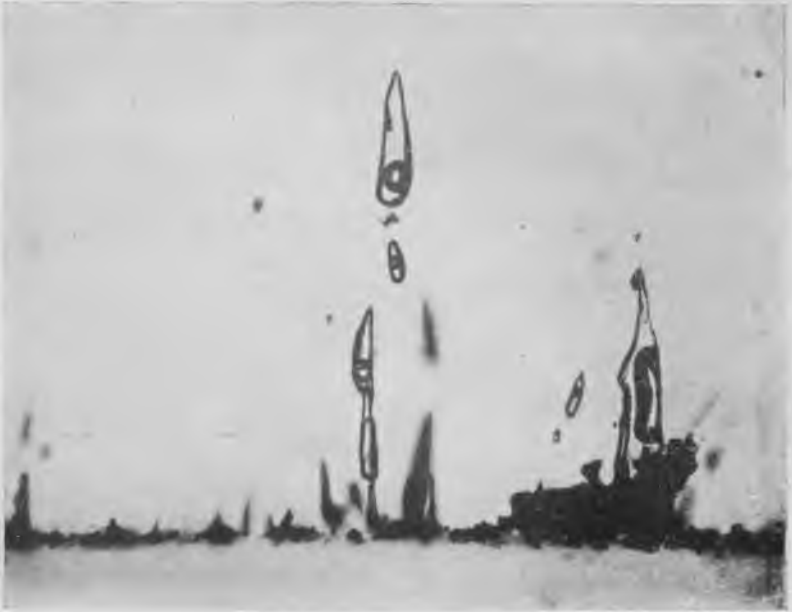


Рис. 2. Соотношение сложных ксеногенных и обычных двухфазовых включений. Внизу видна плоскость затравки

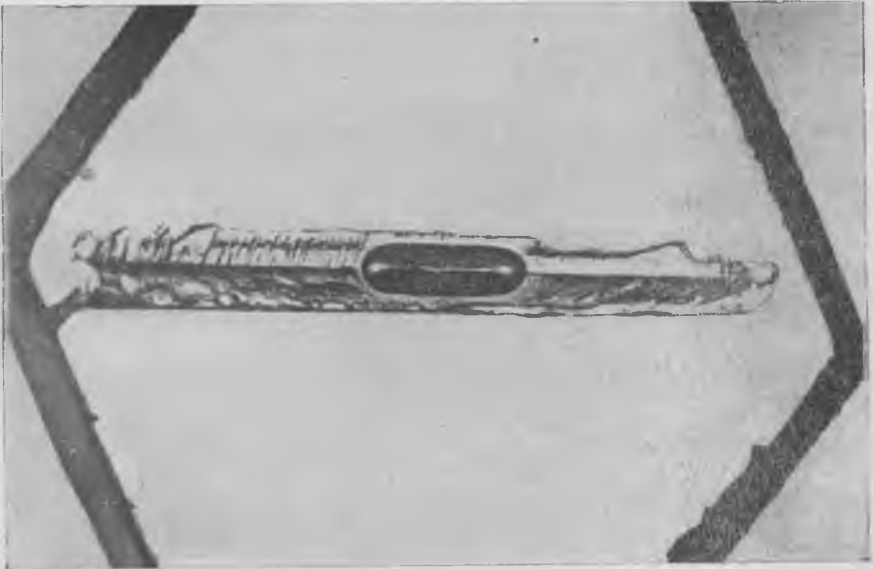


Рис. 3. Вакуоли искусственного включения с ребристой скульптурой стенок

Для получения таких искусственных включений большого объема в кварцах в затравках высверливались отверстия перпендикулярно плоскостям (0001), (0111), (1011) и (1120). В последнем случае ребро кристалла между смежными гранями гексагональной призмы предварительно сошлифовывалось. В дальнейшем эти участки кристалла претерпевали регенерацию. Прежде всего зарастал конец отверстия, обращенный в сторону выхода положительного отверстия. Затем уже зарастало противоположное отверстие.

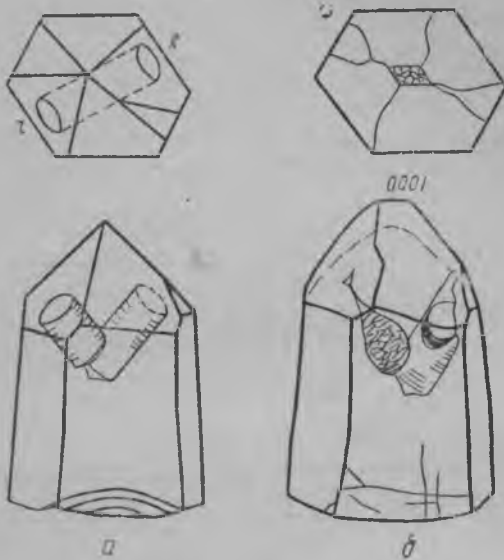


Рис. 4. Зарастание высверленных каналов в кристаллах кварца: а — до начала; б — после окончания опыта

За отрезок времени, необходимый для герметизации включения, его вакуоль в поперечном сечении принимала форму ромба (рис. 3). Обращает на себя внимание микрорельеф стенок полости, имеющей многочисленные выступы и впадины. Плоскости, ограничивающие отдельные выступы, параллельны граням гексагональной призмы.

Соотношение объемов газовой и жидкой фаз равно соответственно степени заполнения автоклава.

Зарастание каналов, просверленных перпендикулярно граням (0111) и (1011) (рис. 4), происходило при постепенном сужении цилиндрической полости, которая принимала уплощенно-трехгранную форму; наиболее быстро зарастало отверстие на плоскости малого ромбоэдра. Интересно отметить, что в результате быстрого роста поврежденных сверлением граней (0111) и (1011) на кристалле появлялась поверхность базиса (0001) (рис. 4, б). Эта грань появилась в результате изменения облика искусственных и природных кристаллов, обусловленного соотношением линейных скоростей роста габитуса граней.

Каналы, высверленные перпендикулярно плоскости (0001), при регенерации приобретают в сечении треугольную форму, но не зарастают до тех пор, пока плоскость (0001) не будет вытеснена ромбоэдрами.

На дефектных затравках канал, параллельный оси L_3 , может зарости и раньше.

Во включении, изображенном на рис. 4, помимо газа и раствора, находилось около 10% нефтеподобных и 25% твердых частиц зеленовато-серого цвета, привнесенных раствором в полость (возможно, асбест). Обращает на себя внимание тот факт, что основная масса твердой фазы в полости находится в канале, расположенном под гранью $(01\bar{1}1)$, т. е. в той части включения, которая перекрылась в первую очередь.

В результате поставленных нами первых опытов удалось получить четыре больших включения, размером до 1 см^3 , из которых одно не было полностью замкнуто. В месте выхода высверленного канала на поверхности грани образовался белый налет силиката. Во всех вакуолях искусственных включений, после извлечения кристаллов и их охлаждения, не наблюдалось выпадения коллоидного кремнезема.

Ввиду хрупкости полученных препаратов и малой толщины выросшего слоя кварца, замыкающего канал, гомогенизация включений нагреванием нами не производилась.

Необходимо отметить, что получение включений больших объемов в искусственных кристаллах кварца представляет несомненный интерес не только для целей минералогической термометрии, но и для исследования состава среды и установления рН в разные периоды процесса синтеза и в различных областях кристаллизатора.

Дальнейшие опыты в этом направлении должны будут показать степень сходства или различия в составе кристаллообразующего раствора и его образцов, оказавшихся замкнутыми в искусственных включениях.

В. П. ПОДГОРНОВА

НЕКОТОРЫЕ ДАННЫЕ ПО ТЕРМОМЕТРИИ ОПТИЧЕСКОГО
ФЛЮОРИТА ИЗ МАГАДАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Исследованный материал был представлен обломками кристаллов, имеющими размеры от 4 до 6 см в поперечнике. Большею частью кристаллы бесцветны и реже обладают бледно-голубоватой, зеленоватой и иногда лиловой окрасками.

Внешние грани поверхностей кристаллов, имевших кубический габитус, матовые, ровные или черепитчатого строения. Все скалы на обломках обнаруживают свилеватое строение.

Описываемый флюорит содержит в основном жидкие, реже — пылевидные включения или включения таблитчатых белых кристалликов, размером не более 1 мм. Изредка встречаются включения сульфидов и турмалина.

О геологическом строении месторождения, из которого были присланы образцы, нам известно только то, что флюорит там приурочен к раздувам кварцево-флюоритовых жил и гнездообразным залежам в зонах дробления оловоносных скарнов. Последние содержали, кроме того, пироксен, гранат, кварц, кальцит, сульфиды железа, цинка, меди, касситерит и другие минералы.

Всего нами было исследовано 145 включений и проведено 540 опытов по нагреванию этих включений в термокамере.

Первичные жидкие включения имеют весьма неправильную форму, иногда с тонкими и даже волосовидными ответвлениями: в последнем случае они приобретают как бы «паукообразный» вид. Эти включения иногда группируются по зонам или связываются с твердыми включениями; чаще же они разбросаны по кристаллу весьма неравномерно, то в одиночку, то группами. Нами выделялись единичные и групповые включения, обусловленные залечиванием трещин.

В одном из обломков кристаллов по включениям удалось выделить пять зон роста. Этот обломок с одной стороны сохранил часть поверхности кристалла черепитчатого строения. Ширина выделенных зон от 0,5 до 1,5—2,0 см. Как видно из табл. 1, температура гомогенизации двух фазовых включений во всех зонах этого кристалла варьирует в пределах 10°.

В других обломках флюорита температуры гомогенизации первичных двухфазовых жидких включений колебались в пределах от 126 до 251°.

Нами установлено, что при многократном нагревании двухфазовых включений температура гомогенизации последних несколько возрастала с каждым новым опытом, особенно при нагревании выше 130—140°, после

Таблица 1

Зоны от центра к периферии	Номера включений и температура исчезновения в них газового пузырька	Примечание
Первая	1) 129°	—
Вторая	1) 134°; 2) 138°; 3) 129°; 4) 122°	—
Третья	1) 138°; 2) 132°; 3) 139°	—
Четвертая	1) 132°; 2) 134°; 3) 129° 4) 136°; 5) 136°; 6) 134°	Включения 2 и 3 связаны с чешуйчатым минералом
Пятая	1) 129°; 2) 134°	—

чего дальнейшее повторение нагревания уже не изменяло температуры гомогенизации. При нагревании происходило некоторое растворение стенок вакуолей, и их раствор приходил в полное равновесие с окружающей твердой фазой, отвечающее моменту полной закупорки включения.

Некоторое визуально незаметное увеличение объема вакуоли до ее изначального объема вызывало увеличение температуры гомогенизации включений. Видимое соотношение газовой и жидкой фаз включений до и после опытов по нагреванию оставалось без изменений, так что это явление нельзя было связывать с растрескиванием кристалла.

В одном образце была обнаружена группа жидких включений, содержащих твердую фазу в виде очень мелких и тонких звездочек. При нагревании этих включений до 70° газовый пузырек начал увеличиваться, заполнив при 104° весь объем включений, а твердое звездчатое включение при этом не только не уменьшалось, а наоборот, отдельные его «лучики» стали увеличиваться. Это явление связано или с отсутствием герметичности, обусловленной наличием лучистого минерала, или же реакцией водного раствора с веществом последнего, обусловившей поглощение воды и рост минерала — гидрата.

В исследованном нами флюорите изредка встречались включения, содержащие твердую фазу также в виде бесцветных или слабо-буроватых кристалликов, которые при нагревании растворились в одном случае при 60°, а в другом — при 64°. Дальнейшее повышение температуры привело к взрыванию этих включений при 124 и 122°, которое произошло еще до полного исчезновения газового пузырька. Второе из описываемых включений вначале нагревалось только до 60°, не до полного исчезновения твердой фазы, потом вновь охлаждалось до 22°. При этом минерал-«узник» снова увеличивался, приняв другие очертания и более интенсивную бурю окраску.

Некоторые, сравнительно немногочисленные, жидкие включения были связаны своим возникновением с чешуйчатыми и таблитчатыми твер-

дыми включениями. Газовый пузырек в этих включениях исчезал при 160—170°. Включения, связанные с позднейшими трещинами, гомогенизировались в температурных интервалах 126—132°, 138—143° и 144—167°. Эти включения, связанные с позднейшими трещинами, имеют в подавляющем большинстве случаев плавные очертания, иногда круглые или яйцевидные. Они всегда несколько сплюснуты в направлении, перпендикулярном плоскостям трещин.

Почти одинаковые температуры гомогенизации первичных двухфазовых включений, располагающихся от центра к периферии кристалла, могут объясняться ростом кристаллов (или, по крайней мере, большей части их) при относительно постоянной температуре.

Обладающие наиболее равновесной формой двухфазовые включения, приуроченные к залеченным трещинам, имеют те же температуры гомогенизации, что и большинство первичных включений, располагающихся по зонам роста.

Выявленные на месторождении монотемпературные или близкие к ним условия роста кристаллов флюорита, по мнению Н. П. Ермакова, являются благоприятным показателем при оценке перспектив месторождения и качества кристаллосырья.

В. Ф. ЛЕСНЯК

О ТИПИЧНОМ СЛУЧАЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ПЕРВИЧНЫХ И ВТОРИЧНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В КВАРЦЕ

Весьма характерное проявление первичных и вторичных включений удалось наблюдать в небольших зонарных кристаллах кварца магматического происхождения, претерпевших позднейшее воздействие гидротермальных растворов.

Кристаллы пирогенного кварца, в которых исследовались включения, представляют собою вкрапленники кислых эффузивных пород Кавказа (окрестности Тбилиси). По форме это бипирамидальные кристаллы, лишь с весьма слабым развитием граней призмы (рис. 1). Размер кристаллов от 2—3 мм до 2,5 см по длинной оси и до 2,3 см в поперечном сечении. Крупные кристаллы желтовато-серого цвета обычно прозрачны в очень тонких пластинках, а мелкие — чаще всего имеют бесцветную матовую поверхность и после ее полировки становятся прозрачными. В продольном разрезе (по главной оси) одного из прозрачных кристаллов кварца наблюдается четко выраженная зональность; особенно ясно видны четыре зоны роста; каждая из них, в свою очередь, разделяется на более узкие зоны, которые фиксируются лишь расположением многочисленных включений минералообразующей среды.

В приведенном на рис. 2 зонарном разрезе кристалла, как и в других подобных разрезах из описанных выше кристаллов, четко выделяются три семейства включений, отличающихся по составу и состоянию: 1) включения затвердевшего расплава, 2) многофазовые включения высококонцентрированных жидких растворов и 3) двухфазовые жидкие включения низкоконцентрированных жидких растворов.

1) Включения затвердевшего расплава (стекла) фиксируют зоны роста кристалла и, без сомнения, являются первичными включениями, отражающими физико-химические условия образования минерала, в котором он вырос. В морфологическом отношении для этих включений характерно то, что они имеют негативную форму кристалла-«хозяина», причем все они, от наиболее крупных до самых мелких, по всем зонам роста закономерно ориентированы, а именно: длинные и короткие оси включений (негативных кристаллов) соответственно совпадают с кристаллографическими осями кристалла-«хозяина» (рис. 2). Такое явление наблюдается редко, и нам неизвестно описание его в литературе. Если эта закономерность является постоянной (что необходимо проверить на других объектах), то тогда негативные кристаллы-включения могут служить надежным диагностическим признаком для определения кристаллографических осей минерала в обломках.

Характерной особенностью затвердевших включений в описываемом кварце является также наличие тонких трещинок и очень мелких пузырьков газа, окружающих включения в виде ореола.

Описанные включения образовались путем захвата капелек расплава (минералообразующей среды) плоскостями граней растущего кристалла,



Рис. 1. Бипирамидальный кристалл кварца из эффузивов Закавказья. Увеличение 3

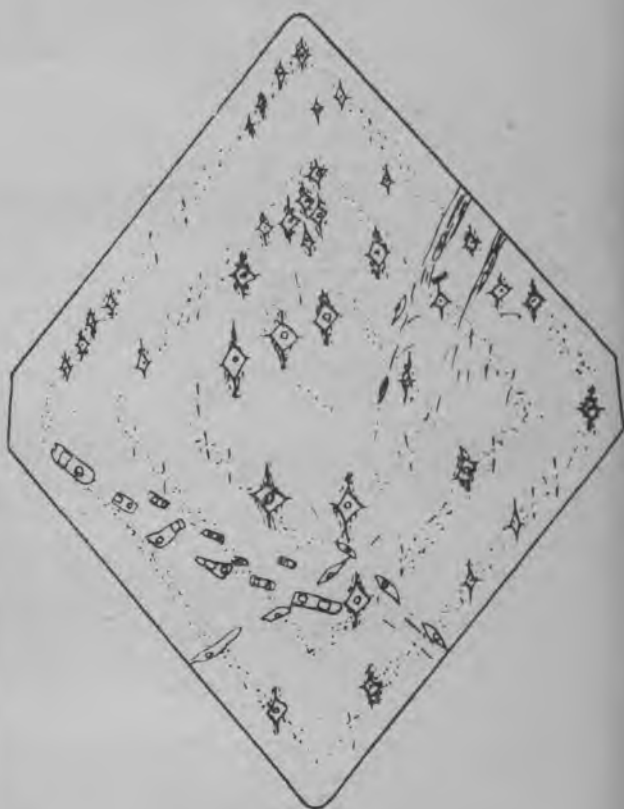


Рис. 2. Продольный разрез пирамидального кристалла кварца с первичными включениями по зонам

при этом четкая зональность кристаллов говорит о некоторой изменчивости условий его роста в расплаве. Первично-вторичные и вторичные включения затвердевшего стекла, по-видимому, не образуются, в связи с вязкостью расплава и затруднением проникновения его по микроскопическим трещинкам вкрапленников.

2) Многофазовые жидкие включения локализируются по трещинкам залечивания, часто пересекающим зоны роста кристалла, и являются вторичными (рис. 2). По своим морфологическим особенностям и составу они резко отличаются от описанных выше затвердевших включений. Это типичные включения гидротермальных растворов с наличием газового пузырька сжатия и твердой фазы в виде кристалликов-«узников» кубической формы. Характерно, что в каждом включении наблюдается лишь по одному минералу-«узнику», что говорит об идентичности образовавшего их раствора во всех включениях, составляющих данное семейство. Включения вытянуты в направлении трещинки, в которой расположены,

и по форме являются то четырехугольными, то треугольными, то трапециевидными, т. е. они менее уравновешены, чем включения расплава (первичные). Размер этих включений не одинаков, но среди них не наблюдается такого контраста в размерах, как среди первичных включений, располагающихся по зонам роста. В некоторых включениях из этого семейства газовый пузырек находится в состоянии вибрационного движения.

3) Двухфазовые жидкие включения низкотемпературных растворов являются еще более поздними, чем многофазовые. Они располагаются по трещинкам залечивания, пересекающим трещины с многофазовыми включениями, и имеют вытянутую форму с заостренными краями (рис. 2). Газовой фазы в них значительно меньше по объему, чем в многофазовых включениях.

Таким образом, в приведенном разрезе кристалла пирогенного кварца наблюдается весьма четкое проявление первичности и вторичности включений, отражающих различные физико-химические условия их образования. Первичные включения формировались в магматический этап роста кристалла кварца, а вторичные (многофазовые и двухфазовые) — на более позднем гидротермальном этапе, уже после формирования вмещающих кристаллы пород.

Таким образом, в данном примере мы встречаемся с генетическими представителями включений в их наиболее типичном выражении. Растворы, образовавшие жидкие включения, не имели никакого отношения к процессу роста включающих кристаллов кварца и эти включения являются действительно вторичными. Другое дело, когда залечиваются трещины в кристаллах горного хрусталя и других минералов, росших в свободном пространстве. Здесь трещины в них, за исключением очень редких случаев, залечивались растворами, омывавшими кристаллы и одновременно отлагавшими внешние их зоны, вплоть до самого наружного, тончайшего слоя. Некоторые исследователи, к сожалению, до сих пор такие включения называют тоже вторичными, хотя за ними в советской литературе уже давно было закреплено название первично-вторичных или мнимовторичных включений.

Принципиальная разница между такими включениями и описанными выше вторичными включениями настолько важна для генетического использования остатков минералообразующих сред в кристаллах, что дальнейшее смешивание понятия о вторичных и мнимовторичных включениях представляется совершенно недопустимым.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
В. А. Калюжный. Кривые гомогенизации в минералогической термометрии и их построение	7
Е. Е. Костылева, В. А. Лабунцов. Изучение растрескивания кварца и универсальный усилитель-регистратор растрескивания	19
А. И. Захарченко, Н. С. Лазаревич, Г. И. Москалюк, А. А. Москалюк. Упрощенный автоматический термозвукорегистратор	33
В. А. Калюжный. Усовершенствованная микротермокамера для анализа жидких включений	43
С. Н. Венедиктов. Термометрические исследования жильного кварца и кристаллов горного хрусталя из кварцевых жил Джебказган-Улутауского района	49
Е. Я. Киевленко. Опыт изучения жидких включений в исландском шпате месторождений Сибирской платформы	55
М. М. Сливко. О включениях растворов в кристаллах турмалина	63
✓ Л. С. Пузанов. Температуры гомогенизации включений в горном хрустале Олгинского месторождения на Дальнем Востоке	69
✓ А. А. Шарков. Термометрия и состав жидких включений в горном хрустале месторождений Нагорного Дагестана	75
Г. Г. Грушкин. Об изменении физико-химических факторов равновесия при минералообразовании на флюоритовом месторождении Аурахмат	81
Л. И. Колтун. Особенности генезиса золоторудного месторождения Лебединое, выявленные по включениям в минералах	93
И. В. Банщикова. Некоторые особенности генезиса месторождения Кара-Оба, выявленные посредством микротермометрического анализа	103
В. Е. Хаджи, Г. М. Сафронов. Включения раствора на границе затравки с нарощими слоями в искусственных кристаллах кварца	109
В. А. Калюжный. К вопросу о герметичности жидких включений	113
И. Н. Маслова. Исследование химического состава включений во флюорите ультрамикрометодом	119
Краткие сообщения	
Г. М. Сафронов. Ксеногенные и искусственные жидкие включения в синтетическом кварце	125
В. П. Подгорнова. Некоторые данные по термометрии оптического флюорита из Магаданской области	127
В. Ф. Лесняк. О типичном случае проявления первичных и вторичных включений в кварце	131

Труды ВНИИП

Том II

Выпуск 2

Исследования минералообразующих растворов
(по включениям)

Редактор ОНТИ ВНИИП С. Д. Ардашникова

Корректоры Е. Н. Бритова, Н. И. Корецкая

Т 13145	Сдано в набор 21/VIII-58 г.	Подписано в печать 12/XII-58 г
Формат бумаги 70×108 ^{1/16} :	8,75 печ. лист.	Уч.-изд. л. 11,1
Заказ 883.	Тираж 800	Цена 7 р. 80 к.

Отдел научно-технической информации
Всесоюзного научно-исследовательского института
пьезооптического минерального сырья

Типография ЦБНТИ. Москва, 1-я ул. Машиностроения, д. 3.