

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ УПРУГИХ СВОЙСТВ ЖИЛЬНОГО КВАРЦА РАЗНОГО ГЕНЕЗИСА ОЛОВОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Комплексное изучение физических свойств жильных кварцев оловорудных месторождений [1—11] проводилось для установления их типоморфных признаков и включало исследование упругих свойств [3, 4], в результате которого было установлено: упругие характеристики имеют разные значения для каждой генетической группы кварца. Температурные зависимости коэффициента линейного расширения β наряду с общим характером изменения его, свойственным кварцу вообще, имеет и существенные отличия у кварцев разных генетических групп и по величине максимального значения β_{\max} при температуре инверсии и по аномальному поведению его в интервале температур 100—550°С [4].

Упругим свойствам минералов и горных пород посвящено много интересных работ, в том числе [12—15], но в них не изучались жильные кварцы вообще, и в зависимости от генезиса, в частности.

Объектом нашего изучения были те же жильные кварцы оловорудных месторождений Забайкалья и Казахстана, что и в [3, 4, 10, 11], любезно предоставленные Е.И. Доломановой, описание которых дано в приложении к табл. 1 работы [10]. Всего изучено более 70 образцов жильных кварцев. Среди них пегматитовые кварцы Казахстана месторождения Бай-Мурза (обр. 402), Забайкалья месторождения Адун-Чолон (обр. 225, 3271) и Онон (обр. 32); высокотемпературные гидротермальные месторождения Бай-Мурза (обр. 101), Зун-Ундур (обр. 395, 396), Онон (обр. 46), Этыка (обр. 3316); среднетемпературный кварц месторождения Тарбальджей (обр. 370); кварцы грейзенов месторождения Шерловая Гора (обр. 2022, 2025); кварц-турмалиновая порода того же месторождения (обр. 2078); низкотемпературные гидротермальные, гребенчатые кварцы месторождения Бай-Мурза (обр. 229), Зун-Ундур (обр. 257, 277).

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ УПРУГИХ СВОЙСТВ

Температурные зависимости упругих свойств измерялись в лаборатории физики горных пород МГИ на приборе МИРГЭМ-1, который соответствует требованиям и широко используется в экспериментах при высоких температурах [18]. Измерения модуля упругости E в интервале температур 20—900°С проводились по схеме прозвучивания с соблюдением равномерного прогрева [19]. Образец длиной 4—6 см помещался в печь, с двух сторон его поддерживали стержни из плавленного кварца. Через этот акустический узел распространялась упругая волна. На экране электронно-лучевой трубки определялось время ее распространения через акустический узел. Скорость распространения ультразвукового импульса при известной длине образца l и времени распространения через него импульса t определяется по формуле $v_D = l/t$, v_D — скорость волны в стержне. Размеры образца соответствовали требованиям [20]. Модуль упругости E вычисляется из формулы $v_D = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$, где ρ — плотность образца. Коэффициент линейного расширения β вычисляется по формуле $\beta = (l_t - l_0)/l_0(T_i - T_0)$, где l_t — длина образца при температуре T_i , l_0 — длина образца при температуре T_0 , $T_i > T_0$. Обе длины l_0 и l_t определяются по показаниям индикатора — тензометра. Погрешность измерения E и β составляет 2—5%.

Жильные кварцы оловорудных месторождений представляют собой мономинер-

ральную кварцевую горную породу, сложенную зернами разного размера и ориентировки. Форма зерен вытянутая.

В кварцсодержащих горных породах согласно законам симметрии могут образовываться пьезоэлектрические текстуры симметрии $\sim m$, $m:3:m$, $4\cdot m$, $2\cdot m$ [16]. Тип симметрии текстуры зависит от полей палеотектонических напряжений, в которых формировался и существовал жильный кварц [17].

В изучаемых нами жильных кварцах преобладает текстура $m:3:m$, что установлено по диаграммам ориентировки оптических осей кварца, построенным Е.И. Русаковой, к.г.-м.н. науч. сотр. ЦНИГРИ. Иногда на фоне текстуры $m:3:m$ прослеживается текстура $4\cdot m$ и $\sim m$.

Текстура $m:3:m$ образуется при ориентировке двух энантиоморфных модификаций кварца относительно двух кристаллографических осей: оптической и электрической, что приводит к наличию двух взаимно перпендикулярных плоскостей симметрии и оси третьего порядка [16].

Образцы вырезались нами параллельно (направление z) и перпендикулярно (направление x) оси симметрии третьего порядка. Соответствующим величинам модуля упругости E и коэффициента линейного расширения приписывались индексы z и x .

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ

Величина коэффициента линейного расширения β при нагревании во всем интервале температур от 20 до 800°С для и того же жильного кварца существенно зависит от ориентировки образца относительно оси симметрии III порядка пьезоэлектрической текстуры.

Для направлений, параллельных оси третьего порядка текстуры, значения β_z во всем интервале температур нагревания меньше, чем для направлений, перпендикулярных ей, значений β_x . Следовательно, для всех генетических групп $\beta_z < \beta_x$. Такая закономерность проявляется и для монокристаллов кварца, где $\beta_{||} < \beta_{\perp}$ т.е. величина коэффициента линейного расширения ($\beta_{||}$) вдоль оптической оси и перпендикулярно ей (β_{\perp}) связаны так же [21]. Для жильных квар-

Таблица 1

Величина коэффициента линейного расширения $\beta_x \cdot 10^5$ град⁻¹ при многократном нагревании высоко-температурного гидротермального кварца месторождения Этыка (обр. 3316, N 1, N 2) и пегматитового кварца месторождения Онон (обр. 32, N 1, N 2)

Температура, °С	3316(N 1)		3316(N 2)		32(N 1)		32(N 2)		
	1	2	1	2	1	2	1	2	3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
150	0,1	0,02	0,3		0,4	0,18	0,2		
200	1,0	0,05	1,2	0,1	1,0	0,5	1,84	0,3	1,1
250	1,5	0,5	1,5	0,5	1,4	1,1	1,6	1,3	1,3
300	1,3	1,0	1,1	1,0	1,8	1,2	1,7	1,9	1,5
350	1,8	1,1	1,6	1,4	2,0	1,8	1,9	1,8	
400	2,0	3,7	2,0	2,0	2,1	2,08	1,64	2,08	1,5
450	2,1	2,8	2,2	2,1	2,4	2,4	2,33	3,92	3,2
500	3,6	2,1	3,5	3,4	3,9	3,7	3,48	4,08	3,8
550	3,9	3,5	3,5	3,5	4,2	3,9	3,69	4,48	3,9
600	7,5	6,3	7,0	6,5	9,9	7,8	8,5	7,6	6,0
650	1,3	0,2	0,7	0,2	2,0	1,8	2,0	0,2	0,1
700	0,2	0,1	0,2	0,1	0,5	0,2	0,2		

Примечание. 1 — первый нагрев, 2 — второй нагрев, 3 — третий нагрев.

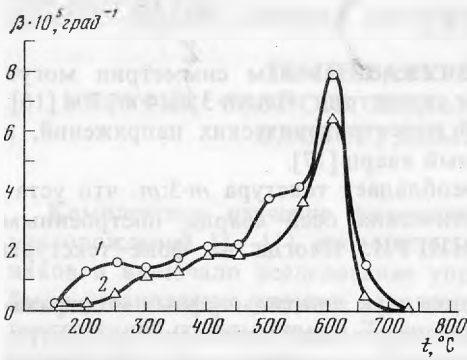


Рис. 1. Зависимость коэффициента линейного расширения β от температуры нагревания для жильного высокотемпературного гидротермального кварца касистерит-полевошпат-кварцевой формации месторождения Этыка (обр. 3316)

1 — первичное нагревание, 2 — вторичное нагревание

цев и всех кварцосодержащих горных пород, необходимо приводить значения коэффициента линейного расширения β с указанием направления относительно оси пьезоэлектрической текстуры. Сопоставлять можно только те значения, которые измерены вдоль одного и того же направления. Разброс значений коэф-

фициента линейного расширения β [4] для жильных кварцев одной генетической группы объясняется тем, что на том этапе изучения не учитывалась ориентировка образца относительно оси текстуры, а потому все значения принимались в расчет без дифференциации по направлениям. Во всем интервале изменения температуры от 20 до 700°C величины β_z всегда меньше β_x , кривые зависимости $\beta_z(T)$ вкладываются в кривые $\beta_x(T)$ для каждого типа кварца. Аномальное поведение в интервале 100—400°C проявляется отчетливо на кривых β_x . Следовательно, при определении коэффициента линейного расширения следует приводить направление относительно оси третьего порядка, по которому он измерялся. Усреднять можно только результаты, полученные по одному и тому же направлению.

Аномальное поведение коэффициента линейного расширения β в интервале температур 150—550°C связано с вскрытием вторичных газовой-жидких включений (150—300°C) и выделением жидкой фазы. Проверка этих положений проводилась на серии образцов, которые неоднократно нагревались. В табл. 1 приведены результаты для четырех образцов. Следует заметить, что общий характер изменения коэффициента β с нагреванием сохраняется, но при повторном нагревании кривая зависимости $\beta(T)$ лежит ниже, как бы "вкладываясь" в предыдущую. В интервале температур вскрытия газовой-жидких включений (150—300°C) при повторном нагревании аномалия исчезает на всех образцах. Аномалия, связанная с выделением из структуры жидкой фазы, не исчезает, но "ступенька" на графике зависимости коэффициента линейного расширения от температуры начинается при более низкой температуре. Например, для обр. 3316 (1) при первом нагревании вода Н-дефектов начинала выделяться с 500 до 550°C, при повторном с 400 до 500°C (см. рис. 1).

Следует отметить, что для β_x в интервале 450—550°C для нерудоносных гребенчатых α -кварцев скорость возрастания значений с температурой та же, что и при температурах выше и ниже этого интервала. Для высокотемпературных гидротермальных жильных кварцев, представляющих собой смесь α -кварца и параморфозы α -кварца по β -кварцу, в этом интервале температур коэффициент линейного расширения сохраняет величину, на кривой зависимости $\beta(T)$ образуются ступенька (обр. 3316, 370), что согласуется с результатами [5, 6, 22].

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ E

При нагревании от 20 до 100°C величина модуля упругости E растет для всех образцов жильных кварцев независимо от их принадлежности к той или иной генетической группе и от направления, вдоль которого вырезан образец. Такое поведение модуля упругости объясняется выделением гигроскопической воды (см. рис. 2, 3, 4).

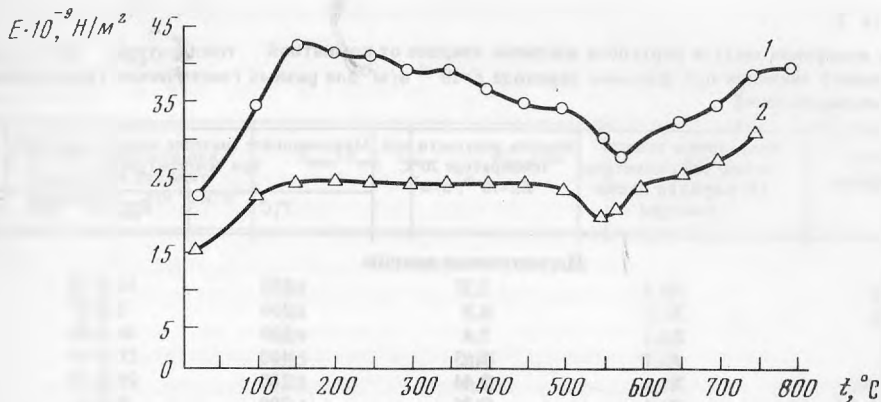


Рис. 2. Температурная зависимость модуля упругости E среднетемпературного гидротермального кварца. Обр. 370, месторождение Тарбальджей

1 — модуль упругости в направлении, перпендикулярном оси симметрии третьего порядка пьезоэлектрической текстуры (E_x); 2 — модуль упругости в направлении, параллельном оси симметрии третьего порядка пьезоэлектрической текстуры (E_z)

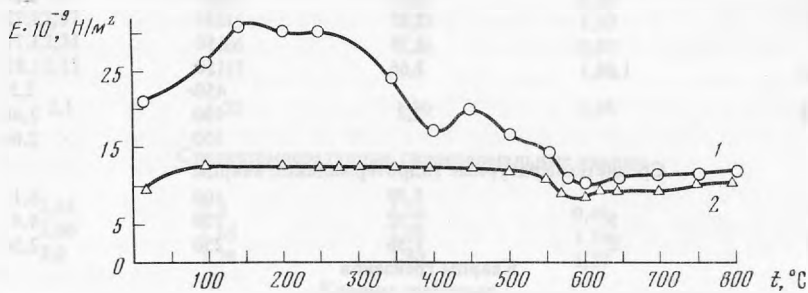


Рис. 3. Температурная зависимость модуля упругости E низкотемпературного гидротермального, гребенчатого жильного кварца. Обр. 229, месторождение Бай-Мурза

1 — E_x ; 2 — E_z , см., рис. 2

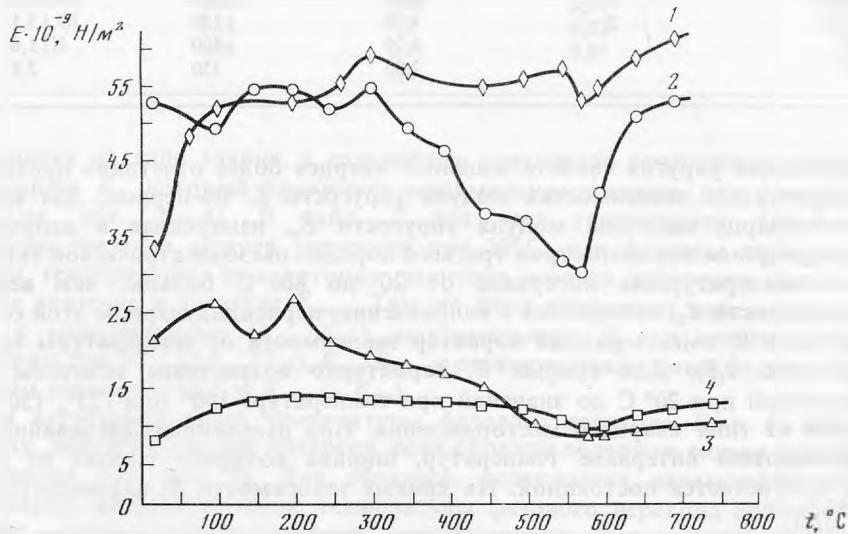


Рис. 4. Температурные зависимости модуля упругости E пегматитовых кварцев

1 — обр. 225, месторождение Адун-Чолон; 2 — обр. 402, месторождение Бай-Мурза; 3 — обр. 32, месторождение Онон (E_x); 4 — обр. 32, месторождение Онон (E_z)

Таблица 2

Пределы изменения модуля упругости жильных кварцев от комнатной температуры 20°С до минимального значения при фазовом переходе $E \times 10^{-10}$ н/м² для разных генетических групп оловянных месторождений

Номер образца	Направление относительно оси симметрии III порядка пьезотекстуры	Модуль упругости при температуре 20°С $E_{20} \times 10^{-10}$, н/м ²	Максимальное значение модуля упругости при температурах:	
			T , °С	$E_{\max} \times 10^{-10}$ н/м ²
Пегматитовые кварцы				
402(1)	X	3,37	250	5,72
402(2)	X	4,9	300	5,67
225	Z	5,4	300	5,96
3271	Z	1,63	400	3,17
32(1)	X	2,44	200	3,46
32(2)	X	2,26	200	2,8
32(3)	Z	0,93	200	1,47
Высокотемпературные гидротермальные кварцы				
395(1)		4,0	200	5,12
395(2)		2,32	150	3,34
101		2,97	350	3,72
46		2,78	150	3,71
3316(1)	1,66	1,66	150	1,87
			450	2,5
3316(2)		2,2	100	2,48
			350	2,64
Среднетемпературные гидротермальные кварцы				
2078		5,38	100	6,1
370(1)	X	2,32	150	4,4
370(2)	Z	1,56	250	2,56
Кварцы грейзенов				
2022		2,4	150	2,76
2025		1,83	150	
Гребенчатые, низкотемпературные гидротермальные кварцы				
229(1)	X	3,16	150	3,84
229(2)	Z	0,98	200	2,08
229(5)	Z	2,08	150	3,1
275		1,29	300	1,64
277		2,03	350	2,85

Анизотропия упругих свойств жильных кварцев более отчетливо проявляется на температурных зависимостях модуля упругости E . Во-первых, для каждого жильного кварца величина модуля упругости E_x , измеренная в направлении перпендикулярном оси симметрии третьего порядка пьезоэлектрической текстуры, во всем температурном интервале от 20 до 800°С больше, чем величина модуля упругости E_z , измеренная в направлении, перпендикулярном этой оси. Во-вторых, E_x и E_z имеют разный характер зависимости от температуры нагревания (см. рис. 2,3). Для кривых E_z характерно возрастание величины модуля от значений при 20°С до значений при температуре 100° или 125°, 150° в зависимости от типа кварца и месторождения. При дальнейшем нагревании в довольно широком интервале температур, ширина которого зависит от тех же причин, она остается постоянной. На кривых зависимости E_x наблюдается "ступенька".

При приближении к температуре фазового перехода α - β происходит убывание величины E_x , а минимальное значение E у всех образцов — при температуре фазового перехода.

На кривых E_x наблюдается максимум при температурах 200 или 250 или 300°С в

Модуль упругости при температуре фазового перехода $E_{\min} \times 10^{-10}$, н/м ²	E_{\max}/E_{\min}	E_{\max}/E_{20}	E_{\min}/E_{20}	$\Delta E = E_{\max} - E_{\min}$ $\Delta E \times 10^{-10}$, н/м ²
Пегматитовые кварцы				
3,04	1,88	1,7	0,91	2,68
3,0	1,88	1,15	0,77	2,67
5,46	1,09	1,1	1,0	0,5
2,72	1,15	1,95	1,68	0,45
0,92	3,78	1,42	0,39	2,4
0,9	3,14	1,24	0,39	1,9
1,04	1,41	1,47	1,17	0,43
Высокотемпературные гидротермальные кварцы				
2,36	2,16	1,27	0,59	1,72
1,5	2,23	1,43	0,69	1,84
2,57	1,45	1,25	1,17	1,15
2,24	1,66	1,34	0,81	1,47
2,12	1,17	1,5	1,28	0,05
2,1	1,25	1,19	0,96	0,38
Среднетемпературные гидротермальные кварцы				
2,64	2,3	1,16	0,49	3,46
2,66	1,65	1,88	1,14	1,74
2,0	1,28	1,63	1,27	0,56
Кварцы грейзенов				
1,67	1,67	1,15	0,69	1,11
0,87	2,47	1,17	0,47	1,27
Гребенчатые, низкотемпературные гидротермальные кварцы				
0,8	4,3	1,21	0,254	3,04
0,89	2,34	2,08	0,91	1,19
1,08	2,82	1,3	0,52	2,02
1,1	1,49	1,27	0,85	0,54
		1,4		

зависимости от типа кварца, а дальнейшее повышение температуры приводит к уменьшению E_x , который принимает минимальное значение при фазовом переходе (см. рис. 2—4). В табл. 2 для всех генетических типов кварца приведены значения модуля упругости при 20°С, при фазовом переходе E_{\min} и указаны температуры, при которых величина модуля упругости имеет максимальное значение и значение E_{\max} . Там же даны отношения максимального значения к минимальному (E_{\max}/E_{\min}), максимального E_{\max} и минимального E_{\min} к значению при 20°С (E_{\max}/E_{20} , E_{\min}/E_{20} и разности между максимальным и минимальным значением ($\Delta E = E_{\max} - E_{\min}$).

При нагревании выше температуры фазового перехода E_x и E_z сохраняют величину, достигнутую при инверсии, если образцы содержат только α -модификацию кварца (см. рис. 3). Для образцов, содержащих параморфозу α -кварца по β -кварцу, нагревание выше температуры фазового перехода приводит к увеличению значения модуля упругости, причем степень роста значения E зависит от условий образования (см. рис. 3,4).

На кривых температурной зависимости E_x более отчетливо проявляется аномалии в интервале 100—450°С, чем на кривых E_z .

ОБЪЯСНЕНИЕ АНОМАЛИЙ В ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ E_x

Аномальное поведение E_x при нагревании выше 100°C , когда из образца уже удалена вся гигроскопическая вода, объясняется тем, что в интервале $100\text{--}450^\circ\text{C}$ происходит выделение жидкой фазы из газовой-жидких включений и из структуры кварца. Температурные интервалы зависят от генезиса кварца. Объясним, почему на кривых E_x отчетливее проступают аномалии, чем на кривых E_z .

При нагревании вскрытие газовой-жидких включений происходит в направлении, где предел прочности на разрыв меньше. В образовавшиеся трещины выходит содержимое газовой-жидких включений. Происходит диффузия жидкой фазы, которая, перемещаясь по образовавшимся трещинам создает дополнительные волноводы упругой волне.

Для жильных кварцев при ориентировке зерен согласно симметрии пьезоэлектрической текстуры $m:3:m$ разрыв газовой-жидких включений будет происходить в направлениях, перпендикулярных оси симметрии третьего порядка. В этих направлениях предел прочности на разрыв меньше, поскольку для кварца предел прочности монокристалла на разрыв в направлении, перпендикулярном оптической оси, в среднем равен 850 кг/см^2 , а параллельно ей — 1160 кг/см^2 [21].

В жильном кварце вскрытие газовой-жидких включений приводит к образованию трещин, расположенных в плоскостях перпендикулярных оси симметрии третьего порядка пьезоэлектрической текстуры. Вдоль трещин распространяется жидкая фаза из газовой-жидких включений и из структуры кварца. Для упругой волны создается дополнительный волновод, который по мере испарения жидкой фазы теряет свои проводящие свойства. В этом и состоит причина появления аномалий именно на кривых E_x в области температур вскрытия газовой-жидких включений и выхода жидкости из структуры кварца.

УПРУГИЕ СВОЙСТВА ЖИЛЬНЫХ КВАРЦЕВ РАЗНЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ ГРУПП

Кварцы пегматитовой формации. Среди них кварцы Адун-Чолона (обр. 225) во всем интервале температур нагревания ($20\text{--}800^\circ\text{C}$) имеют самые большие значения модуля упругости E , которые очень мало изменяются в процессе нагревания. Отличие максимального значения модуля E_{max} при 300°C ($5,96 \cdot 10^{10}\text{ н/м}^2$) от минимального при температуре инверсии составляет $0,5 \cdot 10^{10}\text{ н/м}^2$.

Для обр. 3271 того же месторождения модуль упругости растет от величины $1,63 \cdot 10^{10}\text{ н/м}^2$ при 20°C до $3,10 \cdot 10^{10}\text{ н/м}^2$ при 200°C до $3,10 \cdot 10^{10}\text{ н/м}^2$ при 200°C . В интервале температур $200\text{--}350^\circ\text{C}$ сохраняется значение $3,10 \cdot 10^{10}\text{ н/м}^2$, при 400°C оно становится равным $3,17 \cdot 10^{10}\text{ н/м}^2$ и не изменяется до 550°C . При дальнейшем повышении температуры убывает и при фазовом переходе приобретает минимальное значение $2,72 \cdot 10^{10}\text{ н/м}^2$. Разница максимального и минимального значения модуля упругости равна $0,45 \cdot 10^{10}\text{ н/м}^2$ и составляет 14% от максимального значения (см. табл. 2).

Если для обр. 225 величина модуля упругости при 20°C и температуре фазового перехода почти одинаковы, то для обр. 3271 отношение E_{min} к E_{20} составляет 1,68. Максимального значения модуль упругости для обр. 3271 достигает при 400°C , а у обр. 225 — при 300°C , причем E_{max} первого в 1,88 раз меньше второго (см. табл. 2).

Различия в упругих свойствах в них объясняется тем, что в обр. 3271 очень много газовой-жидких включений (см. приложение к табл. 1 [10]), которые ухудшают упругость кварца.

Для пегматитовых кварцев Казахстана месторождения Бай-Мурза (обр. 402, N 1, N 2) происходит резкое уменьшение модуля упругости. Разница максимального значения при температуре 250°C , 300°C , 300°C и минимального при

температуре инверсии составляет 47% от первого (см. табл. 2). Причина такого поведения их состоит в том, что они образовались на большей глубине, чем кварцы Адун-Чолона, и подвергались сильным тектоническим воздействиям.

При нагревании выше температуры инверсии у кварцев Адун-Чолона (обр. 225, 3271) и Бай-Мурзы (обр. 402) величина модуля упругости растет почти до значений, предшествующих фазовому переходу. Для кварцев месторождения Онон (обр. 32) при нагревании выше температуры инверсии величина модуля упругости остается равной минимальному значению при фазовом переходе. Ононские кварцы представляют собой α -кварцы, что установлено по их ИК-спектрам. Остальные кварцы представляют собой смесь α -кварца и параморфозы α -кварца по β -кварцу, этим и объясняется разница в температурных зависимостях модуля упругости при нагревании выше температуры инверсии.

Высокотемпературные гидротермальные кварцы. Среди них самые большие значения имеют кварцы касситерии — кварцевой формации месторождения Зун-Ундур (обр. 395) (см. табл. 2). Для жильных кварцев Бай-Мурзы (обр. 101) не столь сильно отличаются максимальное значение ($3,72 \cdot 10^{10}$ н/м²) при 350° С и минимальное — при фазовом переходе ($2,57 \cdot 10^{10}$ н/м²), как для пегматитовых кварцев того же месторождения (обр. 402) (см. табл. 2). Высокотемпературные гидротермальные кварцы (обр. 101) претерпели сильное одностороннее сжатие (см. прилож. к табл. 1 [10]).

Среди высокотемпературных гидротермальных кварцев особняком стоят кварцы полевошпат-кварцевой формации месторождения Этыка (обр. 3316). В этой генетической группе они имеют наименьшие значения модуля упругости во всем температурном интервале (20—800° С). Для них ($E_{\max} - E_{\min}$) имеют самое малое значение $0,05 \cdot 10^{10}$ н/м² (обр. 3316N 1) $0,38 \cdot 10^{10}$ н/м² (обр. 3316, N 2) по сравнению со всеми изученными кварцами, принадлежащими к разным генетическим группам (см. табл. 2).

Среднетемпературный гидротермальный жильный кварц также обнаруживает анизотропию упругих свойств (см. рис. 2). Величина модуля E_z в интервале температур 150—450° С остается практически постоянным, отклонения составляют ~3%. Для модуля E_x характерно более резкое возрастание величины, при нагревании до 250° С модуль E_x достигает максимального значения. Дальнейшее нагревание приводит к уменьшению величины E_x . При температуре фазового перехода α - β модули E_z и E_x имеют минимальные значения. Нагревание выше температуры инверсии приводит к увеличению значений модулей E_x и E_z , как и у высокотемпературных гидротермальных и пегматитовых кварцев.

Низкотемпературные гидротермальные, гребенчатые кварцы имеют те же особенности температурных зависимостей E_x и E_z , что и все выше описанные кварцы. Следует отметить, что у гребенчатых кварцев модули упругости имеют самые низкие значения по сравнению со всеми другими генетическими типами кварца (сравнение обр. 402, обр. 101, обр. 229, табл. 2). Среди гребенчатых кварцев более высокие значения модуля упругости у кварцев месторождения Бай-Мурза (обр. 229) по сравнению с кварцами месторождений Зун-Ундур (обр. 257, 277), так как первые образовались на больших глубинах (см. табл. 2). Для гребенчатых кварцев текстура $m:3:m$ является текстурой роста.

ВЫВОДЫ

1. Жильные кварцы оловорудных месторождений имеют пьезоэлектрическую текстуру симметрии $m:3:m$. Для коэффициента линейного расширения β и модуля упругости E во всем интервале температур нагревания 20—800° С обнаружено различие в значениях упругих характеристик, $\beta_x > \beta_z$, $E_x > E_z$ для всех генетических групп кварца.

2. Температурные зависимости E_x и E_z отличаются.
3. Для характеристики упругих свойств жильных кварцев и кварцосодержащих горных пород необходимо приводить величины упругого параметра (β , E) с указанием направления, вдоль которого он измерен.
4. По характеру изменения модуля упругости при нагревании выше температуры инверсии можно судить о присутствии в кварце α -модификации или смеси α -кварца и параморфозы α -кварца по β -кварцу.
5. В пределах одного месторождения наибольшего значения модулей упругости имеют пегматитовые и высокотемпературные гидротермальные, а наименьшие — гребенчатые.
6. В каждой генетической группе кварцы, образовавшиеся на большей глубине по сравнению с остальными, имеют более высокие величины модулей упругости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Успенская А.Б. Экспериментальные и теоретические исследования некоторых вопросов пьезоэлектрического эффекта горных пород. Автореферат канд. дис. М.: ин-т физики Земли АН СССР им. О.Ю. Шмидта, 1966.
2. Доломанова Е.И., Успенская А.Б. Пьезоэлектрические свойства кварцев оловорудных месторождений. — В кн.: Очерки по геологии и геохимии рудных месторождений (развитие идей акад. Д.И. Щербакова). М.: 1969.
3. Успенская А.Б., Абдулманов И.Г., Доломанова Е.И. Зависимость скорости упругих продольных волн в жильных кварцах оловорудных месторождений от генезиса. — Изв. вузов, Геология и разведка, 1969, N 11.
4. Успенская А.Б. Измерение коэффициента линейного расширения жильных кварцев оловорудных месторождений в зависимости от температуры нагревания. — Изв. вузов, Геология и разведка, 1970, N 7.
5. Доломанова Е.И., Гасоян М.С., Рудницкая Е.С. и др. Возможность применения ИК-спектрометрии для определения температуры образования сливных жильных кварцев. — Докл. АН СССР, 1970, т. 192, N 1.
6. Доломанова Е.И., Гасоян М.С., Королев Н.В. и др. Типоморфные особенности гидротермального жильного кварца. — В кн.: Типоморфизм и его практическое значение. М.: Наука, 1972.
7. Успенская А.Б., Пархоменко Э.И. Исследование электрического сопротивления жильных кварцев в зависимости от температуры. — В кн.: Физические свойства горных пород и минералов при высоких давлениях и температурах. М.: 1978.
8. Успенская А.Б., Доломанова Е.И., Бондаренко А.Т. Удельное электрическое сопротивление кварцев оловорудных месторождений. — В кн.: Новые данные о минералах, вып. 29. М.: Наука, 1981.
9. Доломанова Е.И., Горбатов Г.А., Пилоян Г.О., Успенская А.Б. Температура инверсии, диэлектрическая проницаемость и другие свойства кварца разного генезиса. — В кн.: Новые данные о минералах, вып. 29. М.: Наука, 1981.
10. Успенская А.Б. Температурные зависимости удельного электрического сопротивления жильного кварца оловорудных месторождений на постоянном и переменном токе. — В кн.: Новые данные о минералах, вып. 32. М.: Наука, 1983.
11. Успенская А.Б. Температурные и частотные зависимости диэлектрических характеристик жильного кварца оловорудных месторождений. — В кн.: Новые данные о минералах, вып. 32. М.: Наука, 1983.
12. Воларович М.П. Исследование упругих свойств горных пород при высоких давлениях. — Тр. ин-та физики Земли, 1963, N 23 (190).
13. Воларович М.П., Баюк Е.И., Левыкин А.И., Томашевская И.С. Физико-механические свойства горных пород и минералов при высоких давлениях и температурах. М.: Наука, 1974.
14. Воларович М.П., Баюк Е.И., Ефимова Г.А. Упругие свойства минералов при высоких давлениях. М.: Наука, 1975.
15. Баюк Е.И., Воларович М.П., Левитова Ф.М. Упругая анизотропия горных пород при высоких давлениях. М.: Наука, 1982.
16. Пархоменко Э.И. Явления электризации в горных породах. М.: Наука, 1968.
17. Русакова Е.И., Селезнев Л.Д. К вопросу о связи пьезоэлектрической текстуры рудного тела с тектоническими условиями формирования месторождения. Геофизические методы поисков и разведки месторождений золота и цветных металлов. — Тр. ЦНИГРИ, 1973, вып. 109.
18. Ржевский В.В., Вайншток И.С., Ямщиков В.С. Ультразвуковой импульсный прибор для исследования пород. — Горный журнал, 1965, N 1.
19. Дмитриев А.П., Кузьяв Л.С., Протасов Ю.И., Ямщиков В.С. Физические свойства горных пород при высоких температурах. М.: 1969.
20. Силаева О.И. Исследования с помощью ультразвука скорости распространения упругих волн и упругих параметров в образцах горных пород при одностороннем давлении. — Тр. Ин-та физики Земли АН СССР им. О.Ю. Шмидта, 1962, N 27.
21. Минералы. Справочник, т. II, вып. 2. Простые окислы. М.: Наука, 1965.
22. Носик Л.П., Доломанова Е.И., Рождественская И.В. Особенности формирования оловорудных месторождений по данным изотопного состава углерода, кислорода и серы газожидких включений в минералах. — В кн.: Термобарогеохимия земной коры и рудообразования. М.: Наука, 1978.