

Г. П. Барсанов, Э. Я. Гурьева

**О ЗНАЧЕНИИ И МЕТОДАХ ИССЛЕДОВАНИЯ  
 $\alpha$ - $\beta$ -ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИРОДНОГО КВАРЦА****ВВЕДЕНИЕ**

Уже много лет проблема возможности определения температур образования тех или иных минералов или их ассоциаций в природных месторождениях привлекает внимание минералогов. Для этого пытались привлекать различные данные, накапливающиеся в результате различных экспериментов физиков и химиков, работавших над изучением полей устойчивости фаз при изменении температуры, давления и концентрации вещества, а также и геологические соображения, вытекавшие из накопившегося опыта геологов при изучении строения, состояния и возможного температурного режима как глубин земной коры, так и ее верхних оболочек.

К настоящему времени проведено много работ самого различного характера (Ермаков, 1950; Ингерсон, 1958; Смит, 1956 и др.), объединившихся вокруг проблемы так называемой «геологической термометрии». Однако применение найденных или логически обоснованных критериев для ответа на вопрос — каковы же реальные температуры образования того или иного минералообразующего процесса встречается и по настоящее время большие затруднения. Последние связаны главным образом с тем, что применение числовых величин, полученных при «чистых» опытах в лаборатории, часто оказывается невозможным для сложных условий, в которых совершаются образования минералов в природе. Физико-химическая среда, где образуются минералы, нам почти неизвестна, а также мало еще накоплено числовых данных по плавкости, растворимости, полиморфным превращениям и другим физическим константам сложных соединений, отвечающих составу природных минералов. Вместе с тем одной из главных задач на современном этапе развития минералогии является получение четких количественных представлений об основных физико-химических параметрах процесса минералообразования в природных ассоциациях минералов. При этом всегда возникает необходимость получения данных о возможной температуре образования минерального тела, что позволяет строить дальнейшие допущения о фазовом состоянии системы, генетическом типе процесса, объяснять текстурные и структурные взаимоотношения минералов и т. д. Как уже сказано, эти задачи решаются сейчас применением различных методов геологической термометрии.

К настоящему времени эти методы могут быть сведены к следующему: изучение точки плавления минералов; температуры диссоциации; точки инверсии минералов в полиморфных модификациях; температуры распада твердых растворов; температуры перекристаллизации и рекристаллизации; изменения физических свойств в зависимости от температуры; изменение кристаллической формы; температуры синтеза в лабораторных усло-

виях; изменение термоэлектрического потенциала; изучение включений в минералах, температур их гомогенизации, взрывы включений и т. д.; температур эвтектик; определение температур по изотопным соотношениям.

Не входя в детальный разбор возможности применения того или иного метода для различных конкретных задач возможной точности и однозначности температур, полученных применением того или иного метода, отсылаем интересующихся к цитированным выше сводным работам, посвященным описанию и детальному обсуждению каждого метода. Отметим только, что большинство из этих методов являются косвенными, т. е. позволяющими сделать заключение не путем прямого наблюдения, а путем логического сопоставления и экстраполяции имеющихся и полученных данных, а также методами, дающими возможность определить только некоторые интервалы температур образования, выше или ниже некоторой цифровой величины.

Всем известно так же, что большинство из этих методов дают относительные температуры, а так же то, что определение температуры образования минералов часто затруднено необходимостью устанавливать попутно другие данные (например, величина давления, количество и качество примесей, последующий после образования минералов метаморфизм и т. д.) путем умозаключений, а не непосредственных измерений. Все это делает большинство перечисленных методов локальными, т. е. применимыми только для определенных случаев, а получаемые температуры образования, дающими представления только о порядке возможных величин.

Одним из наиболее точных приемов геологической термометрии является, безусловно, использование данных по температурам точки инверсии при полиморфных превращениях. Однако для того чтобы получить интересные для минералогов и более или менее точные данные необходимо соблюдение некоторых условий, а именно: выбранное вещество должно быть широко распространено в природе, т. е. быть одним из обычных минералов; оно должно быть полигенетичным, обладать простым составом и малыми возможностями изоморфизма. Необходимо, чтобы выбранное вещество искусственно воспроизводилось, были хорошо изучены зависимости между температурами точек превращения, величинами давления, влиянием примесей и др. Необходимо также, чтобы превращения носили энантиотропный характер, совершались быстро и полностью, т. е. чтобы отсутствовали возможности существования метастабильных фаз при переохлаждении, закалке и т. д.

Особенно интересным в этом отношении и хорошо изученным в настоящее время является соединение  $\text{SiO}_2$ , отвечающее в общем всем поставленным выше требованиям (Frondel, 1962). Для минералогов, работающих в области пегматитов, грейзеновых и контактово-метасоматических процессов особенно интересны полиморфные модификации  $\alpha$ - и  $\beta$ -кварца, точка инверсии которого при давлении в 1 атм лежит при температуре  $573^\circ \pm 2^\circ \text{C}$ , изменение которой с возрастанием давления хорошо изучено и равно примерно  $20-22^\circ$  на каждые 1000 атм. Кварц как геологический термометр тем более удобен, что он очень распространен в природных ассоциациях, энантиотропные превращения совершаются быстро и неизбежно по достижении температуры инверсии, возможность сохранения неустойчивой формы при переохлаждении или закалке исключена.

Благодаря сказанному установление наличия инверсии в кварце природных ассоциаций в ряде случаев могло бы явиться однозначным критерием для некоторых генетических выводов (например, механизм образования и генезис графических и пегматоидных структур в пегматитах, разделений стадий и определение их фазового состояния при образовании пегматитов, контактово-метасоматических образований, грейзенов и др. высокотемпературных минеральных ассоциаций, выяснить имела ли место

кристаллизация кристаллических горных пород из расплава или образования их шло путем метасоматоза и т. д.).

Однако в действительности это встречало до последнего времени одно, казалось, непреодолимое затруднение. Весь кварц, который мы уже готовым находим в любой горной породе или месторождении, является по своей структуре и свойствам уже  $\beta$ -кварцем. Попытки выделить признаки, которые позволили бы определить—испытал ли существующий кварц  $\alpha$ - $\beta$ -превращение, или кристаллизовался изначально как  $\beta$ -модификация, произведенные многими исследователями, до настоящего времени нельзя считать удовлетворительными. Они основаны или на априорных предположениях (например, что кварц в гранитах, кварц в порфирах и других изверженных породах является  $\alpha$ -кварцем), или на наблюдениях над хорошо образованными кристаллами кварца. Разумеется, если есть хорошо образованные кристаллы кварца, то отличить, какой из кристаллов образовался первоначально как  $\alpha$ - или как  $\beta$ -кварц не представляет затруднения. Но в природе, как известно, кристаллы  $\alpha$ -кварца очень редки, несовершенны и практически встречаются только в эффузивных породах семейства кварцевых порфиров. В силу этого и критерии для различия  $\alpha$ - и  $\beta$ -кварца в природных ассоциациях, предложенные рядом авторов и сведенные в табл. 1, могут быть применены только в очень редких и ограниченных случаях, а иногда, как показали наши исследования, и не являются точными.

Таблица 1

Критерии различия природного кварца

Модификация	Габитус кристаллов	Двойники	Двойники, трещины, габитус	Вицинали
	Маухер	Мюгге	Райт и Ларсен	Кальб
$\alpha$ -кварц	Дипирамидальный, с подчиненным развитием призм. Чаще без призм	Грани дипирамиды и трапецоэдра секутся гранями дофнейских двойников	Пластинки легко растрескиваются при $\alpha$ - $\beta$ -превращении. Бразильские двойники встречаются редко	При помощи вициналий устанавливается наличие или отсутствие одинаково развитых положительных и отрицательных ромбоздров
$\beta$ -кварц	Призматический, с гранями ромбоздров, реже тригонального трапецоэдра и др.	1. Без двойников; 2. С двойниками: грани трапецоэдра не секутся двойниковыми швами	Бразильские двойники встречаются часто. Наличие граней тригонального трапецоэдра и неравномерное развитие ромбоздров. Грани дофнейских двойников на [0001] отчетливы и правильны	По вициналам устанавливается принадлежность к правой или левой форме. На основании изучения вициналий устанавливается асимметрия граней

Считая, что нахождение и выявление бесспорного критерия  $\alpha$ - $\beta$ -превращения в любых зернах и кристаллах кварца явилось бы весьма важным для решения целого ряда генетических вопросов, авторы настоящей статьи поставили перед собой задачу нахождения простых методов и однозначных критериев для различия в зернах, агрегатах и т. д. двух полиморфных (по первоначальному происхождению) разновидностей кварца. Основываясь на многочисленных работах советских и зарубежных исследователей, в первую очередь Е. В. Цинзерлинг, А. В. Шубникова, Г. Г. Леммлейна, Х. С. Йодера, М. Л. Кейта и О. Ф. Тутла и других, авторы обратили прежде всего внимание на изучение законов характера и морфологии двойникования при  $\alpha$ - $\beta$ -превращениях, а так же на характер включений, трещиноватости, соотношениями между двойникованием, трещинами и окраской. В результате выработанной методики получения экспериментального материала и его сопоставления с данными других авторов, были полу-

чены описанные данные и выводы из них, позволившие предложить однозначные критерии для различия в любой форме зерна, агрегатах, при отсутствии граней кристалла  $\alpha$ - и  $\beta$ -модификаций кварца. Достоверность полученных критериев подтвердилась статистической повторяемостью, для чего специальным исследованиям подверглись свыше 300 образцов кварца разного генезиса из различного типа месторождений.

Ставя эту работу, мы считали, что наибольший интерес и полученные из нее выводы могут представить ответ на спорные вопросы о генезисе пегматитов. Действительно, если получена возможность различать изначально кристаллизовавшийся  $\alpha$ -кварц от  $\beta$ -кварца, то были бы получены бесспорные критерии для правильного толкования графических структур, отличия первичной и настоящей эвтектической графики от псевдографических образований для суждения о последовательности образования различных зон, фазовом состоянии и температурах кристаллизации минералов на различных стадиях (и в различных зонах) пегматитового процесса, для решения вопроса о кристаллизации пегматитового тела из расплава или образования пегматитов и их минеральных ассоциаций путем гидротермального по сути дела метасоматоза.

Как известно всем, кто занимается пегматитами, эти вопросы до настоящего времени дискуссионны, решаются по-разному, и это главным образом происходит потому, что решаются они по косвенным данным, путем логических построений, экстраполяций и допущений прилагаемых к трактовке эмперических данных. Утверждения о  $\alpha$ - или  $\beta$ -природе кварца в графике пегматита и в других зонах пегматитовых тел, которые и делались до настоящего времени, также по существу являлись умозрительными, не подтвержденными бесспорными критериями на самом кварце пегматитов [сводку данных по этому вопросу смотри у А. Е. Ферсмана (1940)] или В. Д. Никитина (1958)]. Однако полученные в работе результаты не ограничиваются применением их к расшифровке генезиса только гранитных пегматитов. Нам кажется, что они с успехом могут применяться и при изучении генезиса ряда других высокотемпературных минеральных ассоциаций, горных пород и т. д. о чем уже было сказано.

#### ГАБИТУС КРИСТАЛЛОВ КВАРЦА

В природе кварц, как известно, встречается в виде двух полиморфных модификаций:  $\beta$ -кварц — низкотемпературный, устойчивый при температуре до  $573^\circ$  и  $\alpha$ -кварц — высокотемпературный, устойчивый при температуре  $573-870^\circ$ .

Низкотемпературный  $\beta$ -кварц, кристаллизующийся в тригональной сингонии  $Z_3 3Z_2$ , имеет, как правило, призматический габитус. Основными гранями являются: грани призмы  $m [10\bar{1}0]$ , ромбоэдров — положительного  $R [10\bar{1}1]$  и  $r [1\bar{1}01]$  отрицательного.

Положительный ромбоэдр имеет тенденцию развиваться в виде более крупных плоскостей. Неравномерность развития граней ромбоэдров подчеркивает тригональность  $\beta$ -кварца.

Горизонтальная штриховка на гранях призмы кварца, обусловленная наличием большого числа граней острейших ромбоэдров, придает ступенчатый характер граням призмы. Эти ступеньки имеют нисходящее направление к головке кристалла, что иногда придает кристаллу кварца обелисковидный или веретенообразный вид.

Отсутствие плоскостей и центра симметрии  $\beta$ -кварца влечет за собой наличие энантиоморфных форм — существование правых и левых кварцев (рис. 1).

Кристаллы кварца (правые и левые) отличаются друг от друга следующим: расположением граней трапецоэдра  $x - [51\bar{1}1]$  и дипирамиды  $S - [11\bar{2}1]$ , направлением вращения плоскости поляризации, обратным

направлением полярных осей, фигурами травления и некоторым другим свойствам. По тепловым, механическим, оптическим и электрическим константам правый кварц неотличим от левого.

Высокотемпературный  $\alpha$ -кварц, кристаллизующийся в гексагональной сингонии  $Z_6Z_2$  наиболее изометричен. Кристаллы ограничены гексагональной дипирамидой  $[10\bar{1}1]$  и гексагональной призмой. Часто призма отсутствует и кристаллы одеты только дипирамидой. Иногда ребра бывают пригнуты, но это не меняет изометричного облика кристаллов. Поскольку  $\alpha$ -кварц устойчиво существует при температуре выше  $573^\circ$ , мы на земной поверхности имеем дело с параморфозой  $\beta$ -кварца по  $\alpha$ -кварцу, которая характеризуется трещиноватостью, связанной с  $\alpha$ - $\beta$ -переходом и непрозрачностью кристаллов.

Согласно Мюгге (Mügge, 1933), Розенбушу (Rosenbush, 1925), кварц характерен для порфировых выделений кислых эффузивных пород, где он кристаллизовался в форме гексагональных дипирамид. Не было замечено зависимости формы кристаллов  $\alpha$ -кварца от формы встречающихся вместе с ним минералов.

По Маухеру (см. Г. М. Вировлянский, 1938)  $\alpha$ -кварц относится к I эруптивному типу, кристаллизовавшемуся из магматического расплава при температуре выше  $800^\circ$ .

Дипирамидальные кристаллы кварца описаны А. Е. Ферсманом (1903, 1913) из гранит-порфиров о-ва Эльба и Г. Г. Леммлейном (1930<sub>1,2</sub>, 1943', 1948) из липаритов Самшвильдо (Грузия) и Кафана (Армения). Оба исследователя признают  $\alpha$ -кварц продуктом кристаллизации магматического расплава.

Таким образом, при наличии кристаллов по внешнему виду можно отличить  $\alpha$ -кварц от  $\beta$ -кварца (первоначального). Псевдодипирамидальный низкотемпературный кварц редок (описан в литературе единичное число раз: Долгов, 1954, Малхасян, 1959, Пап, 1956, Смирнов, 1947) и, кроме того, этот кварц так называемого кумберландского типа, кристаллизующийся, по данным Спецна, при температуре  $180^\circ$ , отличается внешне от кристаллов  $\alpha$ -кварца постоянным развитием граней призмы.

Однако в подавляющем большинстве случаев кварц образует мелкие неправильные зерна не охарактеризованные кристаллографически, по внешнему виду которых нет никакой возможности установить их принадлежность к  $\alpha$ - или  $\beta$ -модификации.

### СТРУКТУРА КВАРЦА

Структура  $\beta$ -кварца, по выражению Н. В. Белова (1947), стоит «особняком» и отличается тем, что в ней при меньшей общей симметрии — тригональной, между собой кристаллографически равноценны и атомы Si и атомы O. Тетраэдры  $SiO_4$  можно считать за правильные, так как расстояния Si — O равно  $1,61 \div 1,62 - 1,60 \div 1,62 \text{ \AA}$ ; расстояние O — O равно  $2,62 \div 2,64 - 2,67 \div 2,64 \text{ \AA}$ . Двойные оси тетраэдров параллельны тройной оси всей структуры (рис. 2, а, б).

Структура состоит из последовательных слоев плотнейшей кубической упаковки (перпендикулярных к четверной оси), расположенных по трех-

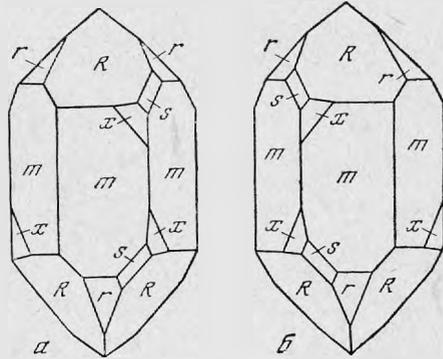


Рис. 1. Формы кристаллов кварца:  
а — правый; б — левый

<sup>1</sup> Морфолого-генетическое исследование кварца. Докторская диссерт., 1943.

слоиному закону, с поворотом каждого квадратного слоя относительно выше- и нижележащего на  $120^\circ$  (рис. 2, б). Тетраэдры, расположенные по вертикальной оси кристалла с поворотом друг относительно друга в одном и том же направлении, по часовой стрелке или против.

В первом случае имеем дело с правым кварцем, во втором — с левым. Такая структура кварца влечет за собой образование каналов, параллельных главной оси, диаметром в  $2 \text{ \AA}$  на каждые  $20 \text{ \AA}$  сечения.

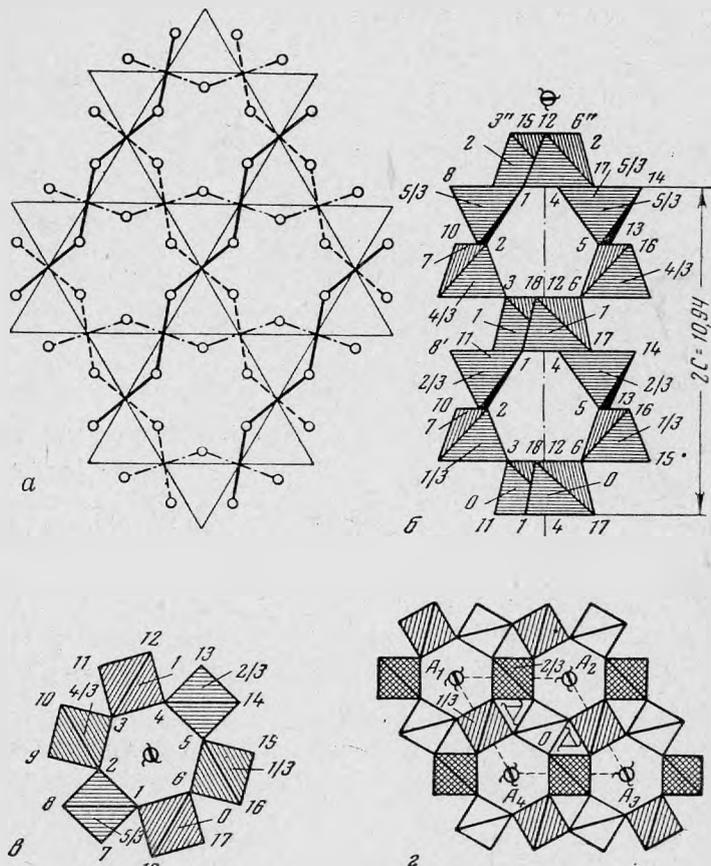


Рис. 2. Структура  $\beta$ -кварца:

а — основной мотив; б — вертикальная проекция; в — план винтовой оси; г — элементарная ячейка

Наблюдаемая в кварце анизотропия физических свойств (механических, электрических, тепловых, оптических и т. д.) также объясняется его структурой, которая характеризуется анизотропией осевых единиц, спиральным расположением кремнекислородных тетраэдров, межатомными пустотами и структурными каналами. Эта анизотропия наиболее резко проявляется в направлении перпендикулярном и параллельном главной тройной оси, из которых направление, параллельное главной оси, проявляется резче.

В направлении, параллельном тройной оси, каркас прочнее и кварц разрушается труднее, менее расширяется и сжимается при термическом воздействии.

Скорость растворения в плавиковой кислоте плоскости базиса в сто и более раз больше, чем грани призмы. Электропроводность, теплопроводность и скорость роста кварца больше в направлении, параллельном главной оси, чем в перпендикулярном.

БНО  
ПО  
НОМ  
ЫМ.  
ЛЬ-

В структурах, относящихся к этому классу, отсутствуют центр симметрии и плоскости симметрии. Кристаллы кварца относятся к тригонально-трапецоэдрическому классу  $Z_3Z_2$ .

По своим структурным данным  $\alpha$ -кварц принадлежит к классу  $Z_6Z_2$  и кристаллизуется в гексагональной сингонии. Эта структура характеризуется отсутствием плоскостей и центров симметрии и наличием винтовой оси шестого порядка в комбинации с простой осью второго порядка, и винтовой оси третьего порядка (Шубников А. В., частное письмо, рис. 3).

Согласно данным последних лет (Зубов, Фирсова, 1956; и др.)  $\alpha$ -кварц обладает пьезоэлектрическими свойствами.

### ФИГУРЫ ТРАВЛЕНИЯ

Фигуры травления кварца изучались главным образом А. В. Шубниковым (1940) и Е. В. Цинзерлинг (1963). Каждой грани кварца отвечают свои собственные фигуры травления. Так, на грани базиса получаются треугольники, лишённые оси третьего порядка. Грани призмы — асимметричные треугольники и четырехугольники, несколько напоминающие лодочки. Фигуры травления на гранях ромбоэдров похожи на грубую штриховку, причем грани положительного и отрицательного ромбоэдров имеют разные фигуры травления.

Фигуры травления левого кварца являются зеркальными отображениями соответствующих фигур правого кварца и дают возможность легко и просто отличить левый кварц от правого, а также различать грани кварца друг от друга. Фигуры травления получаются в результате воздействия крепкой плавиковой кислоты на шлифованную поверхность кварца в течение 25—50 ч<sup>1</sup>. Затем их изучают под микроскопом при увеличении 60—100 раз.

### ОКРАСКА КВАРЦА

В окрашенных кварцах, особенно дымчатых, расположение окрашенных участков обычно носит закономерный характер. Внешне кварц представляется окрашенным равномерно. Однако это не так. Обычно окраска в кристаллах кварца распределяется зонально, секториально или неправильно — пятнисто. Поверхности граней кристалла физически отличны друг от друга, так как плоские сетки не аналогичны в решетке минерала. Скорость роста влияет на распределение окраски, но проявляется главным образом в ее интенсивности.

Для низкотемпературного  $\beta$ -кварца характерно более интенсивное окрашивание граней основного ромбоэдра  $R$ . Грани отрицательного ромбоэдра  $r$  окрашены слабее (иногда, правда, бывает наоборот — грань  $r$  окрашена гуще).

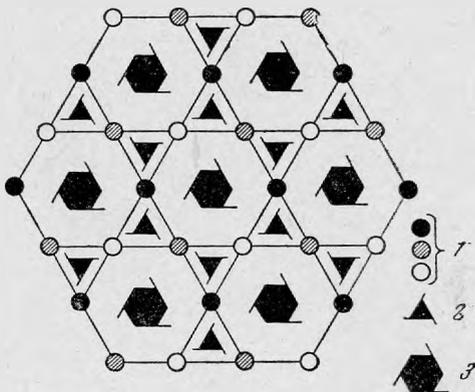


Рис. 3. Структура  $\alpha$ -кварца (по А. В. Шубникову):

1 — атомы кремния в трех «этажах»; 2 — правая винтовая ось шестого порядка в комбинации с простой осью второго порядка; 3 — левая винтовая ось третьего порядка

<sup>1</sup> А. В. Шубниковым разработан метод получения более крупных фигур травления, дающих более точные результаты.

В обоих случаях призма окрашена слабее, или совсем бесцветна.

То же самое относится и к распределению окраски аметиста. Цитриновая окраска концентрируется в пирамидах нарастания ромбоэдров  $R$  и  $r$ . Грани призмы  $m$  или бесцветны, или дымчатые.

Интересно отметить, что то же распределение окраски по пирамидам нарастания отдельных граней отмечено и для синтетического кварца.

Кристаллы, выросшие как высокотемпературный  $\alpha$ -кварц, не обнаруживают отличий в окраске головки, так как грани головки кристалла  $\alpha$ -кварца идентичны по своей природе.  $\alpha$ -кварц из пегматитов часто равномерно окрашен в желтовато-дымчатый цвет.

В двойниковых кристаллах окрашенные участки ограничиваются сторонами пирамид нарастания каждого компонента сростка и двойниковыми границами (рис. 4). Поэтому совпадение границ дофинейского двойника с границами окрашенных областей возможно только для первичного дофинейского двойника, т. е. для двойника роста  $\beta$ -кварца. Иными словами, совпадение границ окрашенных областей в кристалле кварца с границами дофинейского двойника является абсолютным критерием первичности такого кварца, как  $\beta$ -модификации. С другой стороны, равномерное распределение окраски вне зависимости от границ дофинейских двойников указывает на вторичное, более позднее происхождение двойников, в результате

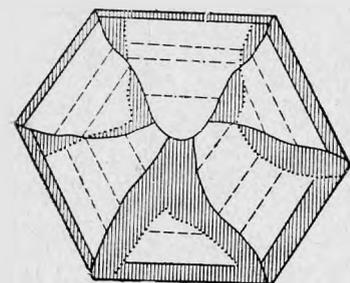


Рис. 4. Схема распространения дымчатой окраски кварца в кристалле, сдвойникованном по дофинейскому закону. Разрез  $\perp L_3$ . Окрашенные (заштриховано) поля околтурены сторонами пирамид нарастания и двойниковыми границами (по Г. Г. Леммлейну)

перехода  $\alpha$ - в  $\beta$ -кварц. Бразильские двойники не являются границами окрашенных областей ни у цитрина, ни у аметиста, ни у дымчатого кварца. Таким образом, по распределению окраски в дофинейском двойнике кварца можно с большой долей вероятности судить о принадлежности того или иного кристалла к  $\alpha$ - или  $\beta$ -модификации кварца. Это положение было установлено Г. Г. Леммлейном (1943) в результате многолетнего изучения окраски кварца.

#### СПАЙНОСТЬ В КВАРЦЕ

Как совершенно справедливо указал Д. П. Григорьев (1958), у кристаллов с анизотропной структурой не может совершенно отсутствовать спайность.

Спайность в кварце наблюдали многие исследователи. Розе, Брейтхаунт, Малляр отмечали спайность в кварце по ромбоэдру, Бекке — параллельно базису, Ферберн (Fairbairn, 1939) устанавливает следующую последовательность для несовершенной спайности у кварца.

1. Спайность параллельная  $[10\bar{1}1] R$
2. » » »  $[01\bar{1}1] r$
3. » » »  $[1010] m$
4. » » »  $[0001]$  (базису)
5. » » »  $[11\bar{2}1] S$

Из отечественных ученых спайность в кварце отмечали В. И. Вернадский — по призме и основному ромбоэдру, А. В. Шубников — по ромбоэдру, призме и базису при надавливании в процессе шлифования пластинок. Г. Г. Леммлейн наблюдал спайность в кварце параллельно призме и дру-

гим направлениям. Е. В. Цинзерлинг экспериментально получила спайность, параллельную базису.

В природе ромбоэдрическая спайность в кварце проявляется чаще. Спайность по базису менее характерна, но в хрусталеносных погребах иногда можно наблюдать отламывание кристаллов по линии базиса. В пирогенном  $\alpha$ -кварце спайность проходит параллельно дипирамиде и базису. Эту спайность наблюдали Славик (Slavik, 1902) под микроскопом в кварце из кварцпорфиров, Г. Г. Леммлейн — на кварце из Самшвильдо, А. Е. Ферсман — на материале с о-ва Эльба.

Блосс (Bloss, 1957) провел экспериментальную работу по выяснению характера спайности в  $\alpha$ - и  $\beta$ -кварце. В результате были подтверждены уже известные данные, что спайность в  $\beta$ -кварце следует (по убыванию совершенства) в таком порядке —  $Rrm$  базис  $1/2\%$ . Спайность по  $x$ ,  $S$ , вероятно, имеется, но не наблюдалась. В  $\alpha$ -кварце спайность по дипирамиде является преобладающей. Трещины по призме развиты хуже, чем в  $\beta$ -кварце.

Некоторые исследователи, в том числе А. Е. Ферсман (1913), Лешателье (La Chatelier, 1890) считают, что возникновение трещин спайности параллельно дипирамиде является результатом инверсии, переходом  $\alpha$ -кварца в  $\beta$ -кварц.

### ВКЛЮЧЕНИЯ

Кварц, как правило, бывает богат включениями. В  $\beta$ -кварце гидротермальных жил встречаются твердые и газовой-жидкие включения. Изучению их посвящена огромная литература; главными являются работы Г. Г. Леммлейна, Н. П. Ермакова и исследователей львовской школы.

Как твердые включения в кварце встречены — слюды, гематит, рутил, апатит, хлорит, актинолит, полевые шпаты и другие минералы. Часто они располагаются зонально, фиксируя остановки в росте и положение кристалла в полости.

Среди газовой-жидких включений первичные, приуроченные к зонам роста и пирамидам нарастания, относительно редки, в то время как вторичные встречаются очень часто. Размеры как тех, так и других варьируют в широких пределах — от микроскопических до видимых невооруженным глазом. Форма газовой-жидких включений разнообразная — от неправильной до формы отрицательного кристалла. Вторичные включения локализируются по трещинам залечивания, часто пересекают зоны роста или идут по самым разнообразным направлениям. Газовой-жидкие включения  $\beta$ -кварца — включения гидротермальных растворов, с наличием газовой пузырька и кристаллов узников, часто кубической формы. Изучению их состава посвящена специальная литература (Маслова, 1961; Элинсон, Польковский, 1961).

Наиболее интересными в  $\alpha$ -кварце являются включения стекла. Они располагаются по зонам роста и часто имеют форму отрицательного кристалла. Располагаются такие включения строго закономерно — ось  $Z_6$  включения параллельна оси  $Z_6$  включающего кристалла. Таким образом в разрезах, параллельных главной оси, такие включения имеют вид четырехугольников, в разрезах же, перпендикулярных  $Z_6$ , — правильных шестигранников. Размеры таких включений от сотых долей миллиметра до 0,25 мм, редко крупнее (рис. 5).

Для кварца пегматитов характерны существенно газовые включения. Размеры и форма их могут быть самыми разнообразными. Наблюдаются включения и в форме отрицательного кристалла с несколько сглаженными углами. Ориентировка их, также как и ориентировка включений стекла, закономерная, правда несколько менее ярко выраженная. Газовые включения часто выглядят темными благодаря полному внутреннему отражению.

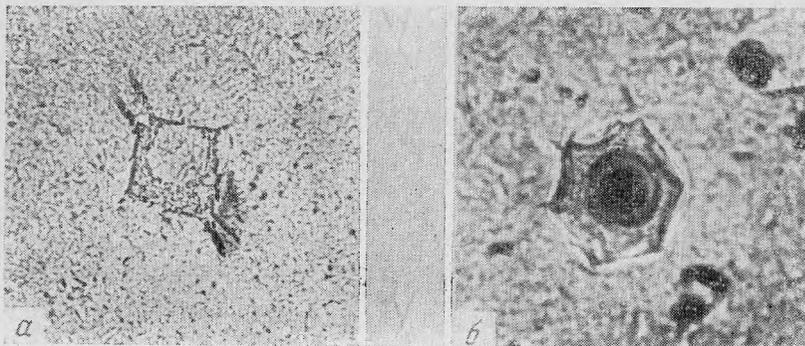


Рис. 5. Включения стекла в высокотемпературном кварце:  
 а — разрез  $\parallel L_6$ ; б —  $\perp L_6$ . Проходящий свет, без анализатора. Увсл. 300

Вторичные трещины в параморфозе  $\beta$ -кварца по  $\alpha$ -кварцу залечены и изобилуют газовой-жидкими включениями, сотовые трещины в кварце Воьлины также. Интересно отметить, что среди этих вторичных включений, некоторые — в форме отрицательного кристалла, но кристалла  $\beta$ -кварца, низкотемпературного, длиннопризматического. Изменилась структура минерала — изменилась и форма отрицательного кристалла включения.

#### ИНВЕРСИЯ КВАРЦА

$\alpha$ - $\beta$ - превращение кварца обратимо, так как обе полиморфные модификации похожи в структурном отношении и кристаллизуются в сходных сингониях ( $\alpha$ -кварц в гексагональной,  $\beta$  — в тригональной). Такие превращения осуществляются легко, сопровождаются небольшим изменением объема и поэтому мало зависят от давления ( $22^\circ$  на 1000 атм).

А. Е. Ферсман условно принял точку инверсии кварца в пегматитах с учетом давления за  $600^\circ$ . Эту точку А. Е. Ферсман считал границей для окончания геофазы *C* (графической) и начала фазы *D* (пегматоидной). Выше инверсии, в фазах *A* и *B* — кварц кристаллизуется как  $\alpha$ -модификация; ниже — как  $\beta$ -модификация.

$\alpha$ -кварц отличается несколько иным расположением атомов в структуре. Неправильные тетраэдры, свойственные  $\beta$ -кварцу, приобретают правильность при  $t > 573^\circ$ . Превращение происходит без разрыва связи, изменения координации, так как при приближении температуры к точке инверсии происходит ослабление сил связи между Si и O.

Перестройка структуры осуществляется смещением атомов (Белов, 1947). Это смещение равно  $8^\circ 20'$  по отношению к первоначальному положению. Структурные изменения влекут за собой морфологические, которые выражаются в изменениях угла между гранями ромбоэдров *R* и *r* и гранями ромбоэдра и призмы:

Для $\beta$ -кварца	Для $\alpha$ -кварца
$R : r = 83^\circ 34' 7''$	$R : r = 83^\circ 28' 4''$ Rinne a. Kolb, 1911)
$R : r = 85^\circ 46'$	$R : r = 85^\circ 25'$ (Dana, 1910).

Состояние равновесия в структуре и расположении атомов при температуре, близкой к инверсии, настолько неустойчиво, что достаточно изменения температуры на  $0,1^\circ$  для перехода одной модификации в другую, устойчивую при данных условиях (Цинзерлинг, 1961). Параметры решетки увеличиваются (Шубников, 1940):

$$a - 4,903 \text{ \AA} - 4,989 \text{ \AA}$$

$$c - 5,393 \text{ \AA} - 5,446 \text{ \AA}$$

По другим данным (Хлапова, 1962), параметры решетки  $\beta$ -кварца с повышением температуры от комнатной до  $550^\circ$  плавно увеличиваются, а в интервале температур  $550-575^\circ$ , т. е. в области инверсии, резко возрастают:

$$\begin{aligned} a & - 4,961-5,027 \text{ кХ} \\ c & - 5,468-5,580 \text{ кХ}, \end{aligned}$$

Объем элементарной ячейки возрастает с 116,54 до 122,11  $\text{кХ}^3$ .

Параметры элементарной ячейки  $\alpha$ -кварца в диапазоне от  $570$  до  $600^\circ$  повышаются:

$$\begin{aligned} a & - 4,983-5,028 \text{ кХ} \\ c & - 5,400-5,447 \text{ кХ} \\ v & - 116,12-119,20 \text{ кХ}^3. \end{aligned}$$

Рентгеновская плотность в интервале температуры  $550-573^\circ$  резко падает, рентгеновская плотность в интервале  $570-600^\circ$  тоже уменьшается, что указывает на разрыхление кристалла.

При  $\alpha$ - $\beta$ -превращении наблюдалось скачкообразное изменение ряда физических свойств (Цинзерлинг, 1961): оптических (показателя преломления, двупреломления), угла вращения плоскости поляризации; симметрии решетки; механических (объема, модуля упругости коэффициента линейного расширения); тепловых — теплоемкости, поглощения тепла. Но в последние годы установлено, что удельный вес кварца и энтропия при инверсии изменяются непрерывно, а не скачкообразно.

Полученные в последние годы результаты специальных исследований (Хлапова, 1962) указывают, что в пределах  $550-580^\circ$ , т. е. в области  $\alpha$ - $\beta$ -перехода существуют обе модификации кварца. По-видимому, в макроскопически гомогенном кристалле зародыши другой модификации создают в области  $\alpha$ - $\beta$ -перехода микрогетерогенное, блочное, двухфазовое состояние. Благодаря этому на дебаеграммах, полученных при  $550, 560, 570, 580^\circ$ , одновременно существуют отражения от  $\alpha$ - и  $\beta$ -кварца.

Во время охлаждения происходит сокращение объема следующим образом:

$$600 - 500^\circ \sim 2\%;$$

при инверсии оно равно 0,86% от первоначального)

$$500 - 400^\circ \sim 1,5\%;$$

$$400 - 300^\circ \sim 1\%.$$

Итак, за время охлаждения с  $600$  до  $300^\circ$  объем кварца уменьшается приблизительно на 4,5—5%. Соответственно изменяется удельный вес кварца от 2,65 для  $\beta$ -кварца до 2,51 для  $\alpha$ -кварца.

Относительно скорости  $\alpha$ - $\beta$ -превращения мнения исследователей расходятся. Раньше считалось, что так как процесс проходит без разрыва связей, то относится к типу мгновенных трансформаций.

Последние данные заставляют допустить существование двух фаз  $\alpha$ - и  $\beta$ -кварца в течение некоторого короткого времени.

Кейт и Татл (1954) исследовали превращение кварца естественного и искусственного методом дифференциально-термического анализа. Они установили, что степень измельченности образцов не влияет на точку превращения кварца. Они наблюдали для некоторых кварцев постепенное превращение на протяжении  $20^\circ$ . Инверсия возникает в различных точках кристалла и не всегда одновременно. Неоднородности в структуре в одних случаях могут служить причиной стабилизации  $\beta$ -модификации при

более высоких температурах, в других — наоборот, способствовать превращению при более низких температурах. Часто превращение начинается с поверхности кварца, так как здесь ионы кислорода сильно поляризованы в асимметричном поле ионов кремния и силы связи скорее ослабевают. Главной причиной вариаций точки инверсии являются примеси. Присутствие больших количеств германия повышает точку инверсии на  $40^\circ$ , а алюминий и литий снижают температуру инверсии на  $120^\circ$ . В обоих случаях температура инверсии зависит от температуры образования кварца (для искусственного). Чем ниже температура образования, тем выше температура инверсии и наоборот.

Что касается естественного кварца, то температура инверсии изменяется очень мало. Были исследованы кварцы из гранитов, пегматитов, кварцевых жил и из пустот в известняках. Более 70% всех изученных кварцев имеют температуру инверсии  $572,5-573,5^\circ$ . Наиболее высокой температурой инверсии обладает кварц из пустот в известняках —  $573,6-574^\circ$ .

Общий разброс составляет  $\sim 1,6^\circ$ . Гистерезис значений температур инверсии при нагревании и охлаждении составляет  $0,5^\circ$ .

Зависимость точки инверсии кварца от давления и, следовательно, возможной глубины залегания была определена в 1920 г. Ионсенем до давлений  $8250 \text{ атм}$  (т. е. с глубин порядка  $33 \text{ км}$ ). Образцы, взятые с разных глубин, различаются по температуре инверсии в пределах  $1^\circ$ , температура возрастает с глубиной залегания кварца.

В последние годы эти данные были уточнены Иодером (младшим) (1954) и Джибсоном.

Т а б л и ц а 2

Зависимость точки инверсии кварца от давления

Давление, бар	Температура инверсии, $^\circ\text{C}$		Давление, бар	Температура инверсии, $^\circ\text{C}$	
	Иодер	Джибсон		Иодер	Джибсон
0	572,3	573	5 000	704	699
1000	599	595	8 000	777	796
3000	653	643	10 000	815	869

### ДВОЙНИКОВАНИЕ КВАРЦА

Двойники кварца были открыты в первой половине XIX в. после того как были обнаружены энантиоморфные формы кварца и его способность вращать плоскость поляризации.

В природе практически весь кварц оказывается сдвойникованным.

Двойники кварца можно разделить на две группы:

1. Двойники, у которых главные оси в обоих индивидуумах параллельны друг другу. Это дофинеийские, бразильские двойники и двойники Лейдольта, последние возникают в результате дофинеийского двойникования в образце, в котором имеются бразильские двойники.

2. Двойники с непараллельными главными осями. Это японские и др. (рис. 6).

Бразильские двойники, называемые оптическими (срастание правого кварца с левым), имеют параллельные оси третьего порядка и антипараллельные оси второго порядка. В результате пьезосвойства взаимнопротивоположны точно так же как эффект вращения плоскости поляризации. Поэтому в поляризованном свете, при скрещенных николях бразильские двойники имеют различную интерференционную окраску, вследствие

противоположного вращения плоскости поляризации. Таким образом, ни в пьезотехнике, ни в оптике бразильские двойники использованы быть не могут. В природе эти двойники возникают как двойники роста, при срастании отдельных индивидуумов, что подтверждается наличием инородных включений в плоскости двойникования.

Г. Г. Леммлейн показал, что бразильские двойники возникают только на той стороне кристалла, на которую оседали мельчайшие частички. Бразильские двойники имеют характерные прямолинейные двойниковые границы. Методом нагрузки и методом  $\alpha$ - $\beta$ -превращения (Цинзерлинг,

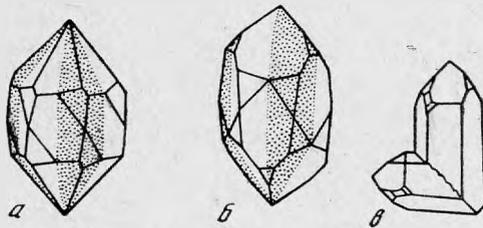


Рис. 6. Двойники кварца по законам:  
а — дофинейскому; б — бразильскому; в — японскому

1956) было доказано, что двойниковые границы в результате всех превращений остаются без изменения. В результате кручения, отжига и воздействия электрического поля границы бразильских двойников оставались неизменными. «Винтовое расположение атомов в решетке кварца настолько прочно, что механическим образом изменить существующее направление невозможно. Чтобы превратить правый кварц в левый, нужно разрушить всю кристаллическую решетку кварца и затем вновь ее построить», — пишет Е. В. Цинзерлинг (1956, стр. 147).

В результате механического воздействия на бразильский двойник возникают дофинейские двойники, расположение которых не зависит от контуров бразильских двойников и рисунок их не нарушается. Таким образом, механическим путем бразильские двойники не могут быть получены, что хорошо согласуется и с теоретическими положениями, и доказано работами Е. В. Цинзерлинг, которая в своей многолетней работе по превращению двойниковатого кварца в монокристалльный ни разу не наблюдала образования бразильских двойников в результате механических деформаций или в результате  $\alpha$ - $\beta$ -превращения кварца.

В природе, по Коцу (Kozu, 1952), наблюдается десять типов японских двойников кварца, среди которых наиболее распространено срастание левых, правых и правых с левыми. Главные оси сросшихся индивидуумов составляют угол в  $84^{\circ}33'$ .

В природе японские двойники образуются, вероятнее всего, путем срастания отдельных индивидуумов. Механически они не воспроизводятся. Высказывалось предположение о возможности получения японских двойников механическим путем, однако на опыте оказалось, что при концентрированной нагрузке, направленной вдоль определенной плоскости, в любых направлениях этой плоскости образуются дофинейские двойники.

Поскольку ни бразильские, ни японские двойники кварца не могут быть образованы путем  $\alpha$ - $\beta$ -превращения, они более детально рассмотрены не будут и все дальнейшие рассуждения касаются дофинейского двойникования кварца.

Дофинейские двойники кварца образуются при срастании двух правых или двух левых кристаллов. Они имеют параллельные оси третьего порядка и антипараллельные оси второго порядка, вследствие чего исчезает их поляриность. Оптически дофинейский двойник ведет себя как монокри-

сталл вследствие однозначного вращения плоскости поляризации и может быть использован в оптике.

В природе большинство дофинейских двойников возникает в процессе роста, но дофинейские двойники могут возникнуть и по другим причинам при механических воздействиях, таких как сжатие, растяжение, кручение в электрическом поле и в результате  $\alpha$ - $\beta$ -превращения кварца.

Морфология искусственных двойников, полученных в результате указанных причин в лабораторных условиях, детально описана в работе Е. В. Цинзерлинг (1961).

Двойникование кварца существенным образом отличается от двойникования других минералов, таких, например, как галит или кальцит. При двойниковании кальцита происходит сдвиг части кристалла в двойниковое положение или кристалл разбивается на чередующиеся параллельные слои полисинтетических двойников. А. В. Шубников и Е. В. Цинзерлинг установили, что двойникование кварца происходит путем молекулярных перегруппировок без изменения форм кристалла, без макроскопических деформаций.

Перестройка решетки кварца происходит, по мнению А. В. Шубникова, путем небольших смещений атомов. При этом не происходит изменения форм и размеров образца.

На рис. 7, а приведена упрощенная схема образования дофинейского двойника.

Два индивидуума срослись по линии  $ГД$  (рис. 7, б), которая является двойниковым швом. Легко видеть, что в области контакта сростков расположение атомов отличается от расположения атомов в каждом сростке в отдельности. Группировка атомов вдоль двойникового шва отвечает структуре высокотемпературного  $\alpha$ -кварца и обладает  $Z_6$ , т. е. шестерной симметрией (рис. 7, в). Рис. 7, в дает представление о механизме образования двойникового положения атомов за счет их смещения. Стрелками указаны направления этого смещения. Атомы  $Si$  расположены на трех атомных плоскостях, смещаются на долю вектора трансляции решетки так, что центры масс решетки остаются на месте. Поэтому форма кристалла не меняется. Геометрически такое положение может быть достигнуто вращением проекции структуры одного индивидуума двойника по отношению к другому на  $180^\circ$  вокруг  $Z_3$  (в данном случае перпендикулярно чертежу).

Из рис. 7, б следует, что оси  $Z_3$  параллельны, а электрические оси (указаны стрелками) антипараллельны. Таким образом, в процессе двойникования происходит перегруппировка атомов в двойниковое положение внутри элементарной ячейки.

В идеальных двойниках двойниковые границы, так называемые швы, между отдельными индивидуумами двойникового сростка представляют собой плоскости. Контуры фигур дофинейских двойников реальных кристаллов могут быть самыми разнообразными — прямолинейными, криволинейными, волнистыми, зубчатыми и т. п. в зависимости от причин и условий образования данного двойника. В природных двойниковых кристаллах границы срастания представлены неправильными поверхностями в результате взаимного прорастания обоих индивидуумов сростка. Части одного и того же кристалла в большинстве случаев разобщены друг от друга и образуют отдельные изолированные участки «островки» в теле другого составляющего сростка. Размеры этих «островков» и расположение их в теле кристалла могут быть самыми различными.

Искусственные двойники, возникшие механическим путем при комнатной температуре, часто имеют прямолинейные контуры, параллельные плоскостям призмы или осям второго порядка.

Контуры фигур дофинейских двойников, полученных при относительно высоких температурах, утрачивают свою прямолинейность.

Вопросами изучения дофинейских двойников кварца в лабораторных условиях занималась Е. В. Цинзерлинг. Ею изучены морфологические особенности двойников, полученных в результате термических и механических воздействий, а также в электрическом поле. Найдены способы раздвойнивания кварца и получения монокристалльных областей.

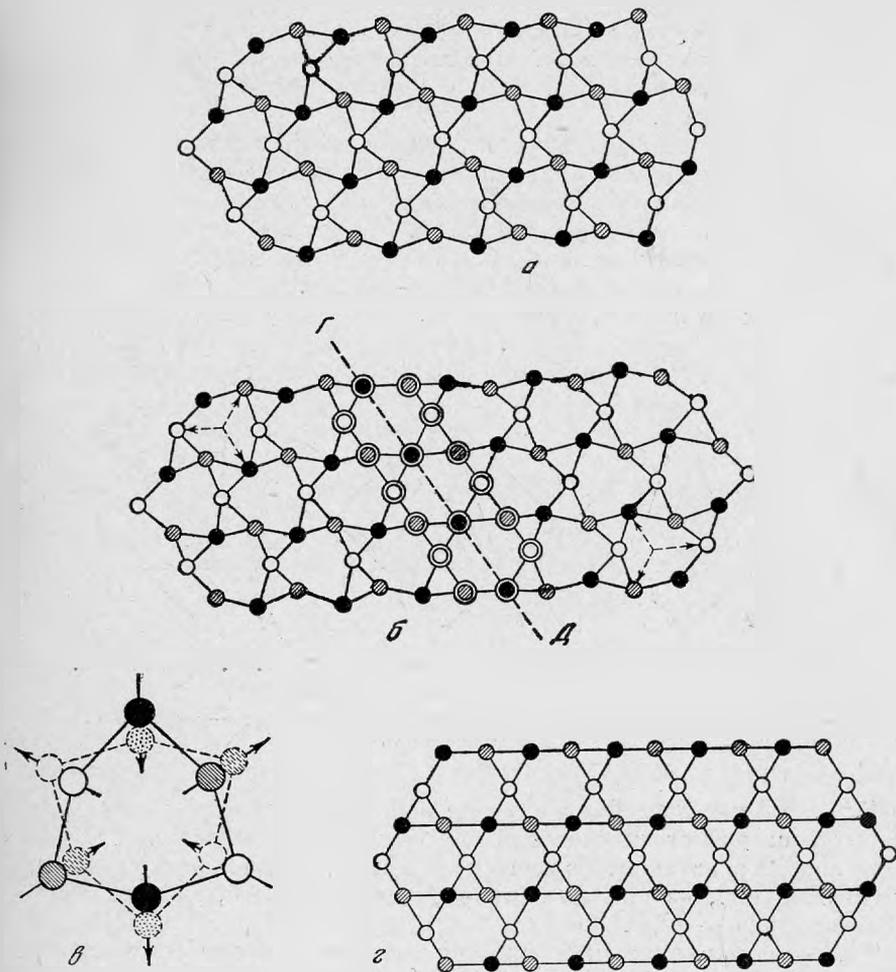


Рис. 7. Схема двойнивания  $\beta$ -кварца:

*a* — монокристалл  $\beta$ -кварца; *b* — его двойник по дофинейскому закону; *c* — схема перестройки атомов при двойниковании. Кружки, изображенные сплошной линией — исходное положение атомов; пунктирные кружки — положение атомов после двойникования, *d* — структура высокотемпературной модификации кварца

Из работ Е. В. Цинзерлинг следует, что рост двойника зависит от величины и направления приложенного напряжения, от длительности его воздействия и от температуры кристалла. С повышением температуры процесс двойникования облегчается. Тепловые движения атомов помогают переориентации решетки — процессу двойникования. Левизна и правизна кварца не имеет никакого значения для образования двойников.

#### ДВОЙНИКОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО $\alpha$ -КВАРЦА

Закономерности первичного двойникования  $\alpha$ -кварца изучены Г. Г. Леммлейном (1930<sub>1,2</sub>, 1948) на материале из Самшвилдо (Грузия), и Кафана (Армения) в 1930—1940 гг.

Двойники  $\alpha$ -кварца образуются путем слияния готовых кристаллов и дальнейшего совместного роста. Слияние происходит по грани дипирамиды, которая таким образом является плоскостью срастания. Разнообразие двойниковых законов сводится к различию угла поворота одного кристалла по отношению к другому вокруг нормали к слиявшимся граням дипирамид.

Г. Г. Леммлейном установлено четыре двойниковых закона:

1. Параллельный сросток. Маленький кристалл прирос к большому в параллельном положении. Такие сростки наиболее прочны и встречаются чаще других.

2. Сросток по закону Эстерель. Маленький кристалл повернут на  $180^\circ$  относительно большого. Параллельный сросток и сросток по закону Эстерель представляют собой оппозиционную пару закономерных срастаний.

3. Сросток по закону Верешпатак. Маленький кристалл прилипает к большому с поворотом на  $140^\circ 32'$ . Сросток по закону Верешпатак является аналогом японского двойника  $\beta$ -кварца.

4. Сросток по закону Самшвильдо. Маленький кристалл повернут относительно большего на  $39^\circ 28'$ . Сростки по закону Верешпатак и Самшвильдо являются оппозиционной парой закономерных срастаний (рис. 8).

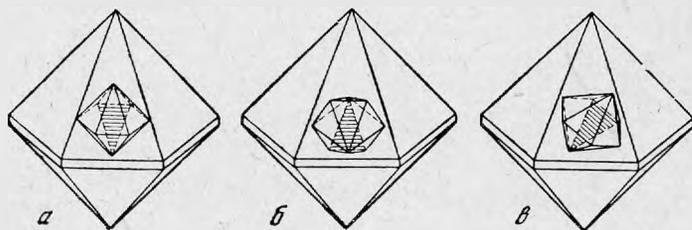


Рис. 8. Схема двойникования  $\alpha$ -кварца (по Г. Г. Леммлейну).

Идеализированный вид:

*a* — параллельного сростка; *b* — сростка по закону Эстерель; *v* — сростка по закону Самшвильдо

Г. Г. Леммлейном было изучено более 6000 кристаллов порфиривого кварца и сделан статистический подсчет частоты встречаемости того или иного закона срастания. Из всего количества параллельных сростков было около 3000 шт., из них по закону Эстерель — 1000, Верешпатак — 800 и Самшвильдо — 1200.

То, что параллельный сросток является более жизнеспособным, Г. Г. Леммлейн объясняет наиболее полным совпадением узлов решетки срастающихся кристаллов.

#### ТРЕЩИНОВАТОСТЬ

При превращении кварца из  $\alpha$ - в  $\beta$ -модификацию в его структуре происходит перераспределение внутренних напряжений, связанных с изменением структуры. Эти напряжения зависят от состояния поверхности кристалла, наличия в нем дефектов (посторонних включений и т. д.), скорости охлаждения. Кроме того, как указывалось выше, при инверсии изменяется объем кварца на 0,86%, а всего в процессе охлаждения — на 4,5—5%. Все это приводит к тому, что кварц при инверсии растрескивается и двойникуется по дофинеискому закону. Растрескивание и двойникование является естественным выходом кристалла кварца из неравновесного, напряженного состояния.

Морфология трещин превращения и закономерности их образования в процессе искусственного  $\alpha$ - $\beta$ -превращения изучены Е. В. Цинзерлинг (1961) и изложены в целом ряде работ. Е. В. Цинзерлинг указывает, что

превращение высокотемпературного кварца в низкотемпературный происходит постепенно и настолько быстро, насколько быстро ведется охлаждение.

Переход  $\alpha$ -кварца в  $\beta$ -кварц можно наблюдать на охлаждаемой пластинке по образованию трещин. Если нагреть пластинку кварца до температуры выше  $600^\circ$  и вынуть ее из печи, то некоторое время она останется цельной — до тех пор, пока не наступит температура инверсии. При температуре инверсии она мгновенно покрывается трещинами. Рисунок трещин складывается из кривых линий, без намека на спайность или отдельность, если пластинка, нагретая выше температуры инверсии, растрескалась без валожения добавочных факторов.

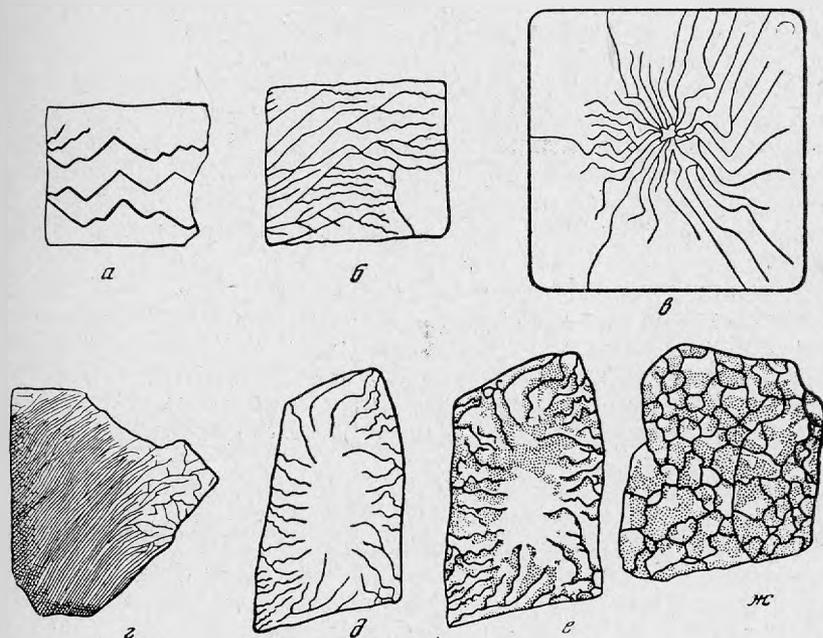


Рис. 9. Характер трещиноватости кварца в зависимости от температуры (Цинзерлинг, 1961):

*а* — пластинка кварца, треснувшая с ребра ( $200 \rightarrow 20^\circ\text{C}$ ); *б* — *д* пластинка кварца, треснувшая при охлаждении с ребра ( $400 \rightarrow 20^\circ\text{C}$ ); *в* — охлаждение пластинки из центра ( $400 \rightarrow 20^\circ\text{C}$ ); *г* — пластинка кварца, треснувшая при охлаждении с ребра ( $600 \rightarrow 20^\circ\text{C}$ ); *е* — двойники и трещины, полученные при переходе точки инверсии при охлаждении с краев; *ж* — двойники и трещины, полученные при переходе точки инверсии при охлаждении из центра

Форма трещин может служить диагностическим признаком температурного образования.

Если разрыв сплошности кварца происходит при приложении внешних сил при комнатной температуре, то трещины образуются параллельно граням ромбоэдров *R* и *г*. При кручении и высокой температуре кварц также растрескивается по ромбоэдру.

Е. В. Цинзерлинг приводит серию фотографий (рис. 9) кварцевых пластинок, нагретых и охлажденных в температурных интервалах  $200 \rightarrow 20^\circ$ ,  $400 \rightarrow 20^\circ$ ,  $600 \rightarrow 20^\circ$ . На этих фото ясно видно, что рисунок трещин получается различный. Кварц, нагретый до  $200^\circ$  и охлажденный, проявляет свойство хрупкости. Линии трещин состоят в этом случае из сравнительно длинных прямых отрезков, параллельных ребру ромбоэдра, идущих под почти прямым углом друг к другу в виде зигзагов (рис. 9, *а*).

При нагревании до  $400^{\circ}$  с последующим охлаждением тенденция трескаться прямолинейно еще сохраняется, но линии трещин становятся уже слегка изогнутыми (рис. 9, б). При нагревании до  $600^{\circ}$  трещин образуется больше и расположение их более густое. Они образуют сетку (рис. 9, в) с величиной ячейки 1—3 мм. Таким образом, кварцевые пластинки, нагретые и охлажденные в указанных пределах температур, трескаются всегда однотипно: вначале трещина имеет зубчатый характер, при этом чем температура выше, тем зубцы становятся мельче и чаще. Если пластинка трескается от краев, отдельные зубчатые трещины начинаются с краев, а к центру пластинки они обрываются, предварительно выпрямляясь. Если пластинка начинает охлаждаться с центра, то трещины зигзагообразные, округлые в центре начинают выпрямляться к периферии пластинки. Значит, всегда можно найти начало и конец трещины. В зависимости от температуры, при которой трещины образуются, они морфологически отличаются: 1) рисунком; 2) характером линий; 3) густотой их расположения и 4) скоростью их распространения. Чем больше температурный градиент, тем скорость распространения трещин больше, количество их увеличивается и трещины более зубчатые. При температуре превращения характер трещиноватости напоминает сетку или согу. Трещины с малой скоростью распространения менее извилисты и проявляют тенденцию спайности.

«Образование трещин и двойников обусловлено одной и той же причиной — внутренними напряжениями, поэтому они всегда сопровождают друг друга как в природе, так и в лаборатории. Все факты говорят о том, что кварц переходит из гексагональной модификации в тригональную, как монокристалл до появления сжатия, когда начинается двойникование, которое продолжается при охлаждении до  $400^{\circ}$  и ниже» (Цинзерлинг, 1961, стр. 61).

Лешателье (La Chatelier, 1890), много занимавшийся кварцем, установил интересную закономерность, выражающуюся в том, что кварц изменяет свой объем с понижением температуры не постепенно, а скачком. В интервале  $1000-600^{\circ}$  — незаметно, даже с некоторым расширением, а по достижении инверсии — с резким уменьшением, что приводит к усадке кристаллов и возникновению трещин преимущественно параллельно ромбоэдру (дипирамиде). Лешателье считает, что наличие трещин, параллельных дипирамиде, закономерным и характерным для кварца, претерпевшего  $\alpha$ - $\beta$ -превращение.

А. Е. Ферсман (1903, 1940) описывает кварц из гранит-порфиров о-ва Эльба с трещинами, параллельными граням призмы, дипирамиде и базису. Наибольшее количество этих трещин наблюдается вблизи контактов с вмещающими породами. В центре жилы их меньше. Для сравнения были изучены кварцы из Самшвильдо (Грузия), Ауэрсберга и Штольцберга (Гарц) и из Верешпатов (Венгрия) — разломы менее выражены, но трещины наблюдаются. А. Е. Ферсман указывает, что причина разломов лежит в сложных процессах молекулярной перегруппировки, которую испытывает кварц при  $\alpha$ - $\beta$ -превращении. Внешняя форма может ответить новой симметрии только при условии образования двойников и механических разломов. Эти явления разломов яснее на контакте, где главным фактором является скорость перехода. А. Е. Ферсман считает эти расколы по плоскостям дипирамиды, базису и призме важным геологическим критерием, на который не влияют другие добавочные факторы, в частности давление.

#### МЕТОДИКА

Поскольку перед авторами настоящей статьи стояла задача нахождения метода различия кварца двух генетических разновидностей ( $\alpha$ -кварца от  $\beta$ -кварца) в мелких, кристаллографически неохарактеризованных зер-

нах, было предпринято детальное изучение двойников и трещиноватости кварца как наиболее вероятного пути разрешения этой задачи.

Для этого было взято 300 образцов кварца различных месторождений из коллекции Минералогического музея АН СССР и личных сборов авторов. Образцы распределялись следующим образом: 150 образцов кварца заведомо низкотемпературного генезиса: из хрусталеносных жил Памира, Алдана, из высокотемпературных гидротермальных жил Тырны-Ауза, из кварцево-ртутных месторождений и т. д.; и 150 образцов кварца заведомо высокотемпературного генезиса: из липаритов и кварцевых порфиров Самшвилдо (Грузия), Кафана (Армения), о-ва Эльба и из пегматитов Воьлини. Методика изучения достаточно проста. Она состоит в том, что образец кварца, кристалл или обломок шлифовывался по определенным направлениям, затем приполировывался и травился плавиковой кислотой. Для сопоставления контуров двойника с распределением окраски в кварце удобнее выпилить пластинку и приполировать ее с двух сторон. Если образец — порода, то все остальные минералы покрываются пленкой парафина, чтобы на зернах кварца не оседали дополнительные продукты реакции. После травления плавиковой кислотой двойниковое строение легко обнаруживается вследствие различных коэффициентов отражения от данного участка кварца, отвечающего одному индивидууму, от соседнего, отвечающего другому индивидууму, находящимся по отношению к первому в двойниковом положении. Протравленный образец промывается, проявившаяся двойниковая структура рассматривается с помощью бинокулярной лупы или микроскопа в косом отраженном свете. Полученная картина фиксируется фотографированием. Обычно травление занимает от 40 мин до 1,5 час. в зависимости от совершенства образцов. Кроме того, наблюдается и анизотропия скорости растворения в HF разных граней кварца. Так, грань базиса (искусственная, т. е. срез  $\perp L_3$ ) травится быстрее всех остальных, затем грань отрицательного ромбоэдра, положительного ромбоэдра и последней — грань призмы. Для получения отчетливой картины трещиноватости, шлифованную и приполированную поверхность образца следует несколько перетравить.

#### АБСОЛЮТНЫЕ КРИТЕРИИ $\alpha$ - $\beta$ -ПРЕВРАЩЕНИЯ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПРИМЕНЕННОЙ МЕТОДИКОЙ

Наша задача заключалась в выявлении различия между морфологией дофинейских двойников роста и двойников превращения. Сравнительные результаты, полученные на 300 образцах заведомо различного генезиса, подтвердили, что такие различия действительно существуют и статистически выдерживаются более чем в 95% случаев.

Морфология дофинейских двойников  $\beta$ -кварца изученных образцов представлена на серии фотографий (рис. 10—14).

Как видно на photographиях, срастающиеся компоненты дофинейского двойника находятся в сложном взаимном прорастании. Это именно те участки и «острова» в теле другого, о которых говорилось выше. Необходимо отметить, что при всей причудливости рисунка и контуров границ первичного дофинейского двойника, они (границы) имеют четкие прямоугольные или ломаные очертания. Значительно реже дофинейский двойник оконтурен кривой, но эта кривая тогда бывает довольно плавной «спокойной».

Размеры первичного дофинейского двойника достаточно крупны. Как видно на прилагаемых photographиях, они редко бывают мельче 3 мм, чаще они измеряются сантиметрами.

Относительно расположения дофинейских двойников можно сказать, что они имеют тенденцию вытягиваться вдоль  $Z_3$  (рис. 10, а, б, в). На гранях ромбоэдров они или их границы иногда вытягиваются диагонально

(рис. 11, а, б). На срезах, перпендикулярных оптической оси или близких к ним, дофинеи́ские двойники иногда имеют секториальное расположение или неправильно пятнистое.

Часто на срезах  $\perp L$  рисунок дофинеи́ского двойника имеет форму трилистника, что является характерным только для  $\beta$ -кварца (см. рис. 19).

Как уже говорилось, первичные дофинеи́ские двойники достаточно крупны и, несмотря на то, что они прорастают друг друга, не заполняют собой всю площадь грани кристалла, или пришлифованной поверхности, оставляя достаточное поле монокристалльной области, что никак нельзя сказать про двойники  $\alpha$ -кварца, образовавшиеся в результате  $\alpha$ - $\beta$ -превращения.

Проследить взаимоотношение трещин и первичных дофинеи́ских двойников не всегда удается. Часто они бывают не связаны, но в двойниках механического происхождения имеют явную связь. Двойники сопровождают трещины. Но контуры их в этом случае тоже прямолинейные, ломаные. В молочном-белом кварце жильного типа, избыточном трещинами, двойники крупнее, очертания их довольно прямолинейны или плавные, иногда совпадающие с трещинами.

Для большей убедительности и наглядности характера морфологии первичных дофинеи́ских двойников и линий их ограничения наиболее сомнительные (мелкие и при микроскопическом просмотре похожие на двойники  $\alpha$ - $\beta$ -превращения) были сфотографированы под бинокулярной лупой при том же увеличении, при котором изучались и фотографировались двойники  $\alpha$ -кварца, т. е. двойники превращения (рис. 14).

Следующим типом кварца, двойники которого были подвергнуты изучению, были параморфозы  $\beta$ -кварца по  $\alpha$ -кварцу из пегматитов Волыни и дипирамидального кварца из липаритов и кварцевых порфиров Самшвилдо, Кафана, о-ва Эльба. Внешне волынский кварц представляет собой крупные кристаллы, часто весом в несколько килограмм, а то и десятков килограмм, изометрического габитуса с сильно развитыми гранями основного ромбоэдра. Часто можно наблюдать в таких кристаллах две генетические разности кварца: внутренняя — параморфоза  $\beta$ -кварца по  $\alpha$ -кварцу, и внешняя —  $\beta$ -кварц, выросший впоследствии на ранне возникшую параморфозу. Граница между этими зонами четкая и резкая. Описываемый кварц бывает как бесцветным, так и дымчатым.

Двойники этого типа кварца (параморфозы  $\beta$ -кварца по  $\alpha$ -кварцу) представлены на рис. 15, а, б и 16, а, б. Как видно из приведенных фото, двойники превращения  $\alpha$ -кварца в  $\beta$ -кварц имеют очень специфический, своеобразный рисунок, совершенно отличный от рисунка или узора первичных дофинеи́ских двойников. Интересно отметить, что характер рисунка двойника не зависит от кристаллографического направления: не наблюдается каких-либо закономерностей на взаимно-перпендикулярных плоскостях среза кристалла, дофинеи́ские двойники на плоскостях параллельных и перпендикулярных оптической оси и на гранях дипирамиды по-прежнему имеют один и тот же характер рисунка.

Линии ограничения двойников превращения — извилистые, кривые, часто причудливые и значительно реже зазубренные или ломаные. Если даже такие и наблюдаются, то на небольшом отрезке контура двойника. Размеры таких двойников также существенно отличаются от размеров первичных дофинеи́ских двойников. Не приходилось наблюдать дофинеи́ских двойников превращения крупнее 2, редко 3 мм. Как правило, они мельче указанных величин, несмотря на крупные размеры кристаллов. Это проявляется более наглядно для кварцев Волыни, но относятся также и к дипирамидальному кварцу.

Дофинеи́ские двойники превращения поражают всю площадь пришлифованной поверхности кристалла, вернее весь объем параморфозы, превращая такой кварц в совершенно непригодный для промышленности.

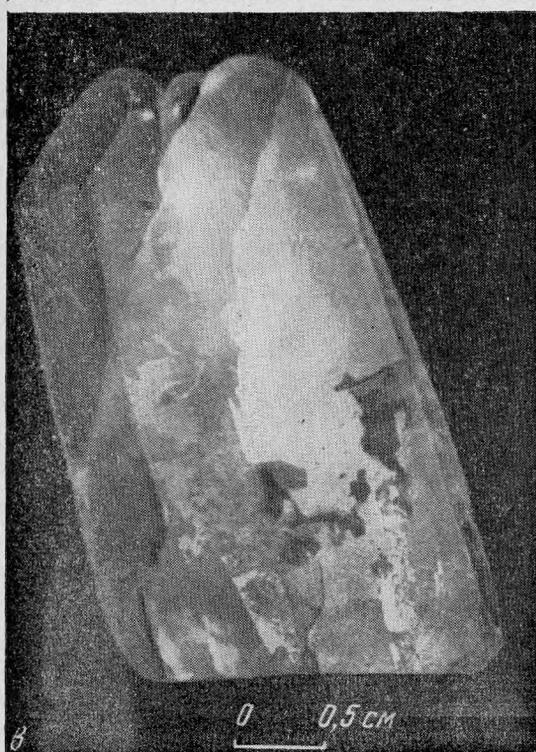
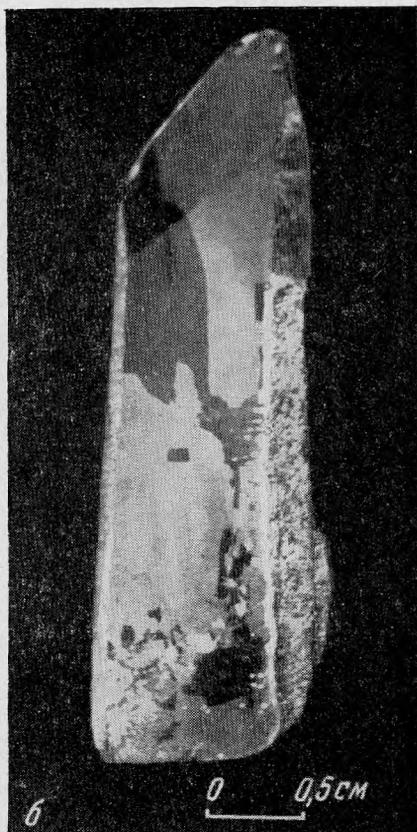
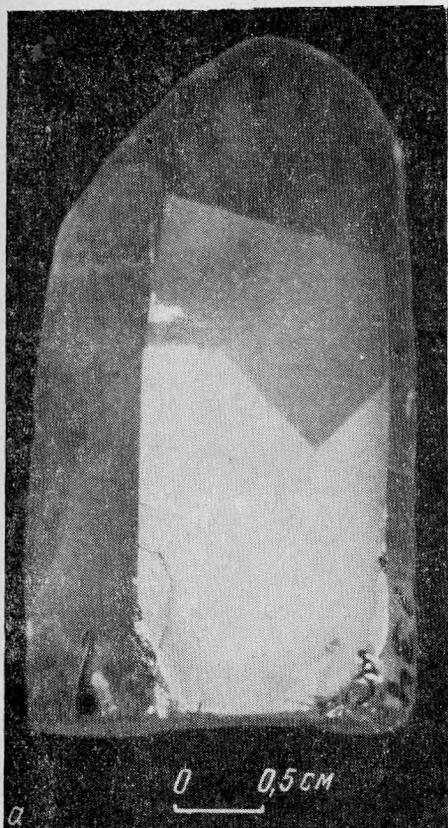


Рис. 10. Дофинейский  
двойник  $\beta$ -кварца:

— на грани призмы; б — на  
рани призмы и ромбоэдра;  
— на плоскости  $\parallel I_3$  двух  
сросшихся кристаллов

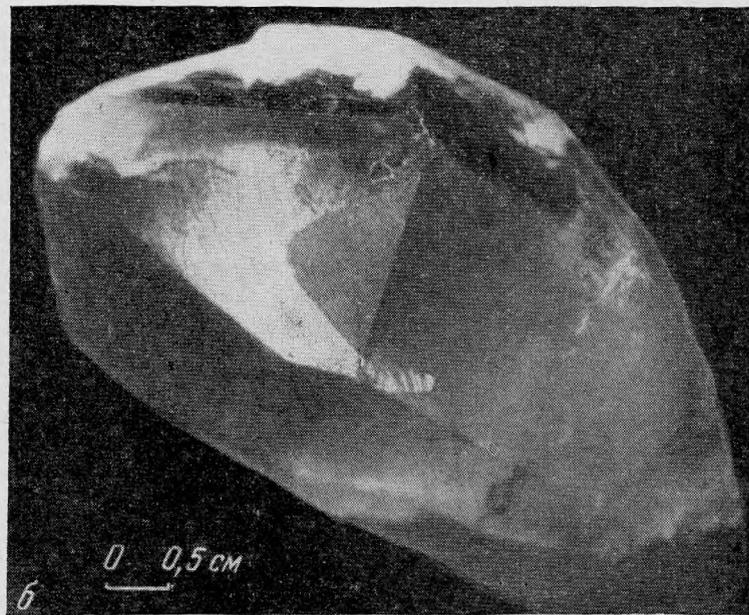
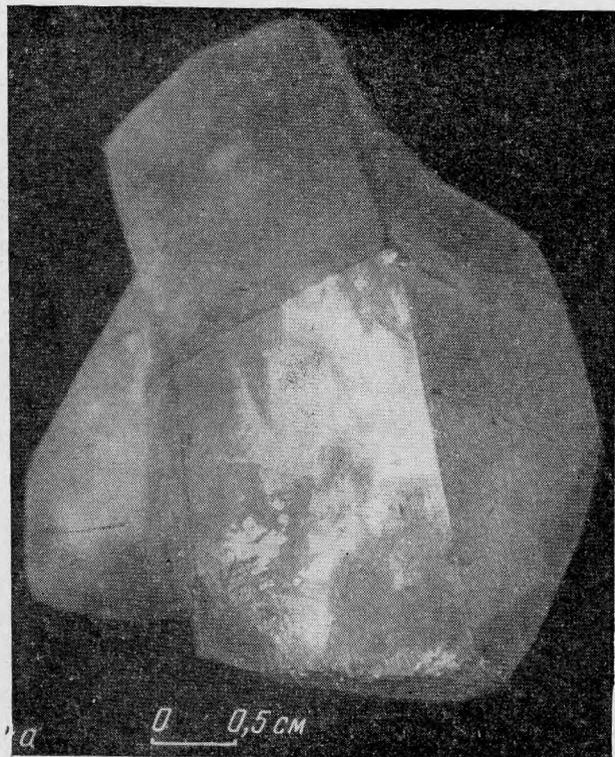


Рис. 11. Дофинейские двойники на грани ромбоэдров:  
— неправильно-пятнистые; б — диагонально расположенные

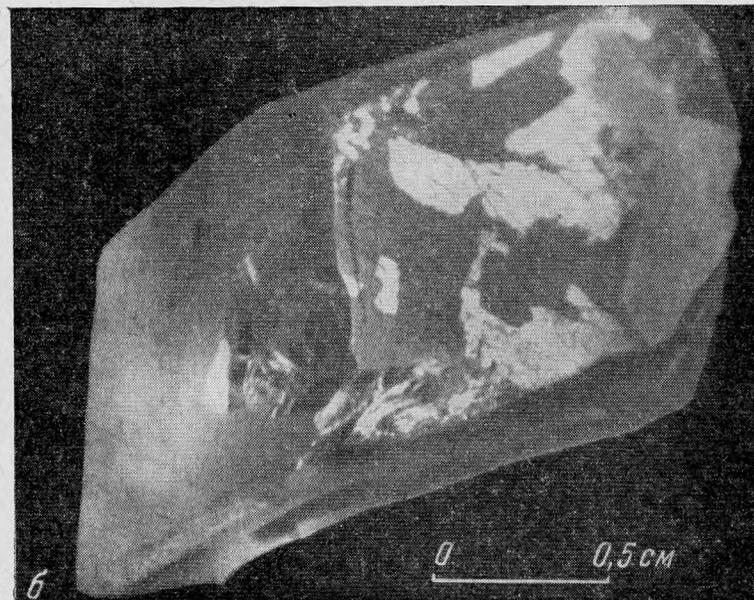
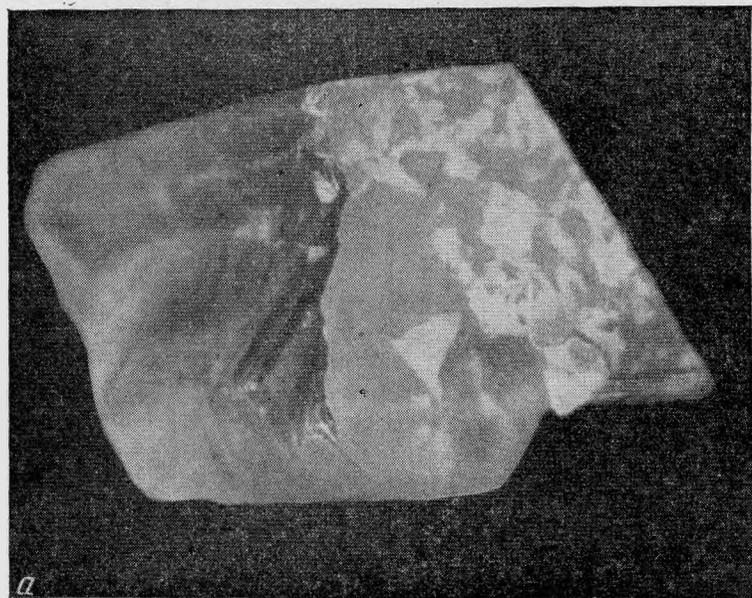


Рис. 12. Дофинейские двойники:  
а — на плоскости [0001]; б — на срезе близком к базису

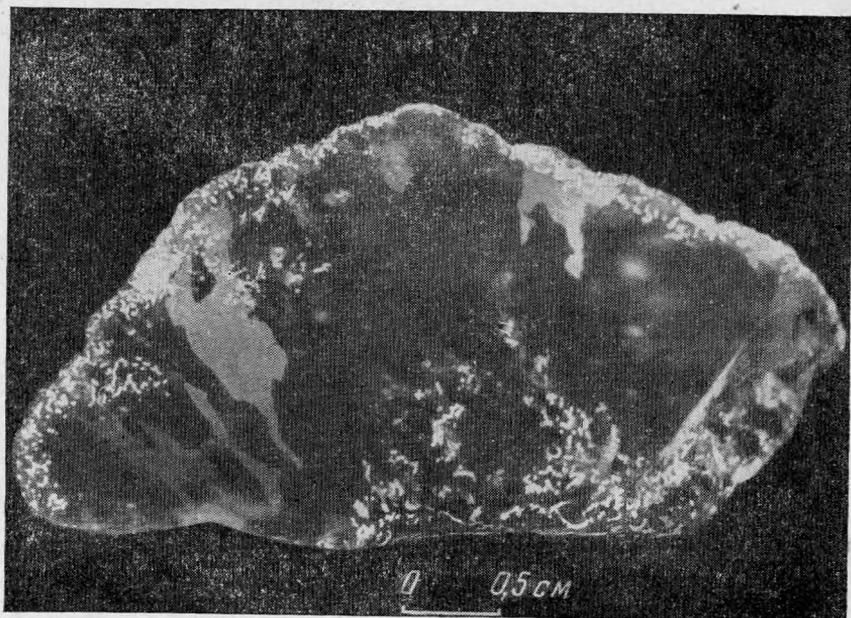


Рис. 13. Дофинейские двойники на неизвестной плоскости



Рис. 14. Дофинейские двойники  $\beta$ -кварца. Увел. 10

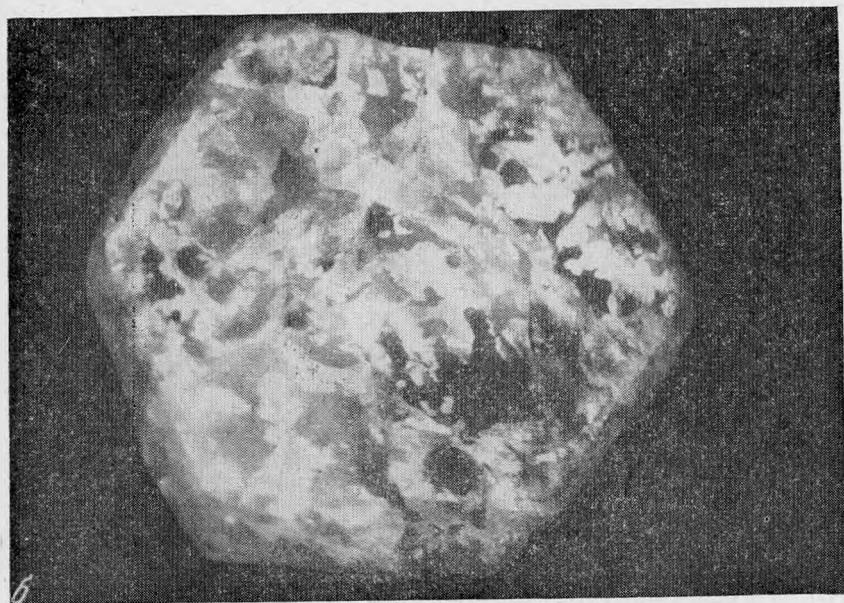
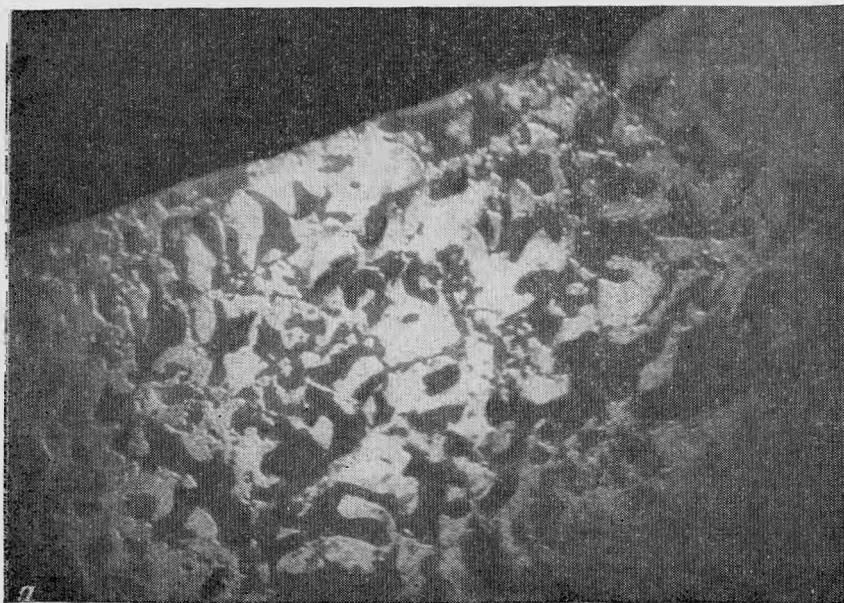


Рис. 15. Дофинейские двойники инверсии. Увел. 10  
а — Вольск; б — Самшильдо

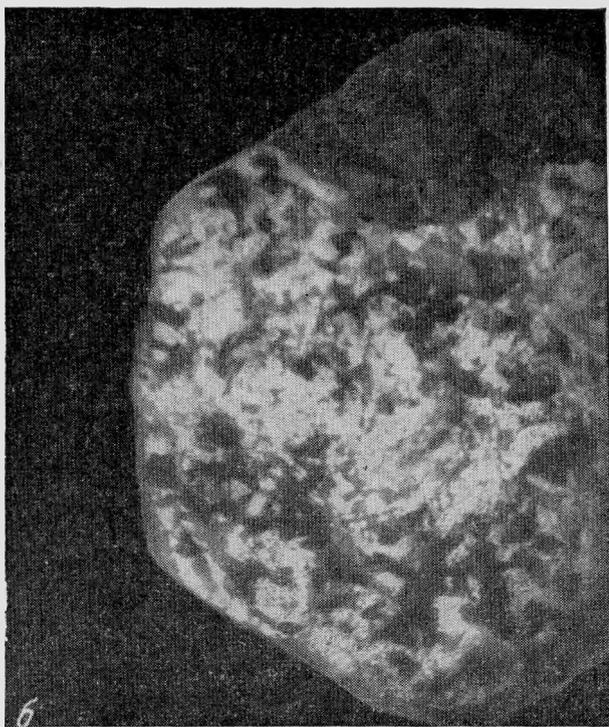
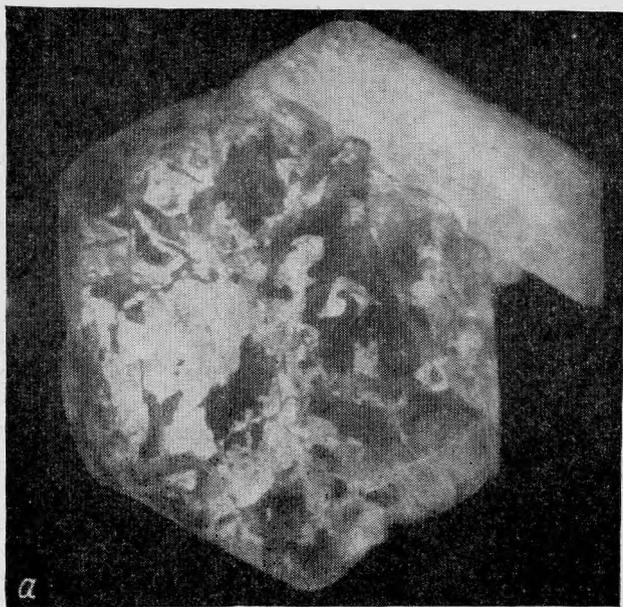


Рис. 16. Дофинейские двойники инверсии. Увел. 10:  
а — Кафан; б — Эльба

Различия в морфологии двойников роста и двойников  $\alpha$ - $\beta$ -превращения приведены в табл. 3.

Другим дополнительным критерием является характер и расположение трещиноватости кристаллов, что показывает, подвергался ли данный кварц  $\alpha$ - $\beta$ -превращению или образовался изначально как  $\beta$ -кварц.

Трещины в кварце, не претерпевшем инверсии, довольно редки. Как правило, они поражают прикорневую часть кристалла, следуя по разным, часто иррациональным направлениям. Головки кристаллов обычно бывают свободными от трещин и других дефектов. Иногда трещины следуют по направлениям несовершенной спайности кварца. Можно наблюдать отламывание кристаллов кварца в хрусталоносных гнездах по несуществующей грани базиса.

Трещины в кварце, претерпевшем инверсию, имеют совершенно другой характер. Во-первых, они отличаются своей частотой или густотой расположения, которая увеличивается в десятки или сотни раз. Рисунок трещин в кварце из камерных пегматитов Волыни, Центрального Казахстана, из пегматитов Золотой горы Борщевочного кряжа и других месторождений пегматитов вполне идентичен тому, что получила Е. В. Цинзерлинг в лабораторных условиях при  $\alpha$ - $\beta$ -превращении.

Наши кристаллы тоже имеют частое расположение трещин, их изогнутость образует сетку с величиной ячейки в 1—3 мм и никакого намека на спайность или отдельность нет. Прямолинейные трещины имеют явно более позднее происхождение, они секут ячеистые трещины (рис. 17, а). Граница между  $\alpha$ -зоной и  $\beta$ -зоной очень резка, что говорит о быстроте инверсии (рис. 17, а, б).

На фото видно, что в  $\beta$ -зоне трещиноватость имеет совершенно другой характер — они (трещины) прямолинейные, резкие, следуют одна за другой на расстоянии нескольких миллиметров, а то и сантиметров.

В дипирамидальном кварце из кварц-порфиров ячеистые трещины также имеют место. Кристаллы дипирамидального кварца очень хрупки и при неосторожном обращении рассыпаются на мелкие обломки размером в 2—4 мм, особенно после травления в HF. Кроме указанных ячеистых трещин, в дипирамидальном кварце наблюдаются параллельные и перпендикулярные главной оси и параллельные дипирамиде, которые являются преобладающими (рис. 18).

Можно полагать, что эти «системы» трещин образовались не одновременно, вероятнее всего, что перпендикулярные главной оси наиболее ранние; затем параллельные дипирамиде, и самыми поздними являются параллельные  $Z_6$ .

Все эти трещины сопряжены с двойниками инверсии.

Пока трудно сказать, которые из них образовались раньше. Трещина может пересекать двойник в одном месте и вызывать образование аналогичного двойника в другом. Двойники вообще прилегают к трещинам (Цинзерлинг, 1961). То же видно и на наших фотографиях — двойники прилегают к трещинам, параллельным дипирамиде. Но те же самые трещины могут быть и более поздними по отношению к двойникам. Вероятно разрыв во времени образования, если он есть, очень небольшой, так как и трещины, и двойники образовались при инверсии кварца.

Некоторую помощь в установлении генетической разновидности образца кварца может оказать распределение окраски. Окраска в кварце распределяется неравномерно, она может быть зональной, секториальной и неправильно пятнистой. Первичные дофинейские двойники (двойники роста  $\beta$ -кварца), как правило, приурочиваются к окрашенным областям в кристалле кварца, на что в свое время указывал Г. Г. Леммлейн (1943). В кристаллах изначального  $\alpha$ -кварца дофинейские двойники не приурочиваются к окрашенным областям, а секут их во всевозможных направлениях. Следовательно, совпадение окрашенных областей в кристаллах

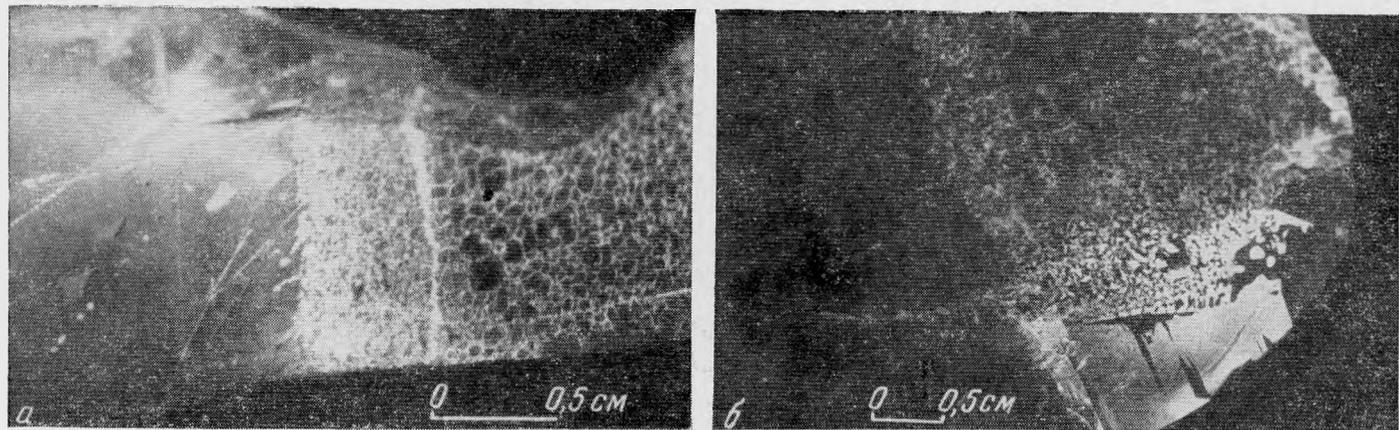


Рис. 17. Контакт  $\alpha$  и  $\beta$ -зоны в кварце:  
*a* — видны ячеистые трещины; *b* — видны двойники разного типа

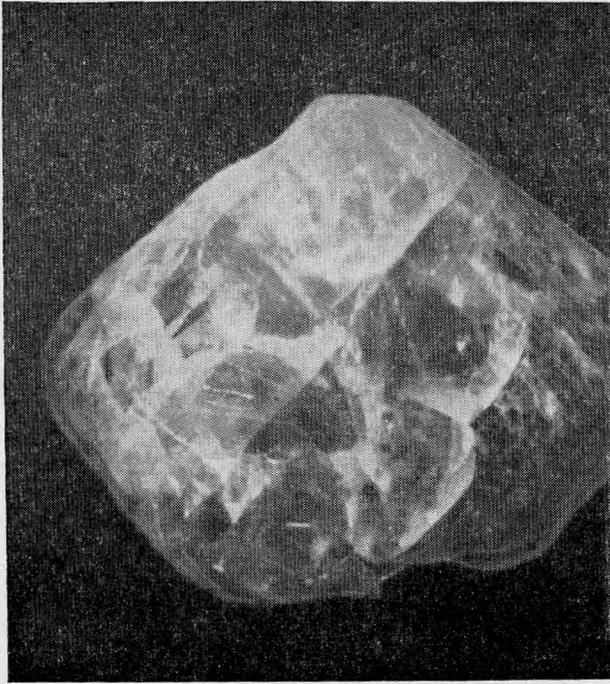


Рис. 18. Трещины в дипирамидальном кварце параллельно дипирамиде. Увел. 10

Т а б л и ц а 3

Различия в морфологии двойникового кварца

Модификация	Двойники	Трещиноватость	Распределение окраски
α-кварц	Двойники только дофинейские, размером не крупнее 2—3 м.м. Линии ограничения кривые, причудливо изогнутые. Рисунок двойников не зависит от кристаллографического направления. Двойникование поражает весь объем кристалла	Характерно присутствие сотовых ячеистых трещин, с величиной ячейки 2—3 м.м, в изгибах петли которых — мелкие двойники. Кварц из линаритов имеет трещины, параллельные граням дипирамиды. И те и другие отличаются большой густотой расположения	Нет совпадения окрашенных областей с границами двойников. В большинстве случаев α-кварц окрашен равномерно
β-кварц	Двойники не только дофинейские, могут быть бразильские, японские и др. Дофинейские двойники крупные, как правило, крупнее 4—5 м.м. Ограничены прямыми, ломаными, зазубренными линиями, или «спокойными» кривыми. Проявляют тенденцию вытягиваться вдоль оси Z <sub>3</sub> . На плоскостях базиса трехлучевая звезда, секторально расходящаяся в стороны трех чередующихся граней. Не заполняют весь объем кристалла, оставляя значительные поля монокристаллической области	Отсутствие ячеистых трещин и трещин, параллельных дипирамиде. Присутствующие трещины не отличаются закономерным расположением и густотой	Совпадение границ дофинейского двойника с границами окрашенных областей возможно только для двойника роста β-кварца

кварца с границами первичных дофинейских двойников является абсолютным критерием первичности такого кварца как  $\beta$ -модификации.

Таким образом, в результате изучения 300 кристаллов природного кварца оказалось, что отличить  $\alpha$ - от  $\beta$ -генерации вполне возможно. Они отличаются по морфологии дофинейских двойников, характеру трещиноватости и распределению окраски (табл. 3).

#### ДАнные, ПОЛУЧЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО, ПО ИЗУЧЕНИЮ КВАРЦА РАЗНЫХ ТИПОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Как указывалось выше, получение критериев, позволяющих отличать кварц, претерпевший  $\alpha$ - $\beta$ -превращение, от первоначально кристаллизовавшегося, как  $\beta$ -кварц, авторами считается весьма важным. Особенно интересовал нас вопрос о возможности различия  $\alpha$ - и  $\beta$ -кварца среди различных его генераций в пегматитовых жилах. А. Е. Ферсман (1940), как известно, придавал этому большое значение, объяснив генезис пегматитов и, в частности, образование структурных зон графического и пегматоидного характера в гранитных пегматитах. Он считал графические структуры следствием эвтектической кристаллизации пары кварц — полевой шпат, и выделил ранний «серый» и «дымчатый» кварц ихтиоглиптов и пегматоидных зерен как  $\alpha$ -кварц.

Полученные при исследовании данные авторы в первую очередь применили в изучении различных генераций кварца в пегматитах классических месторождений. Нами подтверждено, что в пегматитах Воьлини ранний «серый кварц» — это первоначально  $\alpha$ -кварц. В одном кристалле (растущем в камерах из крупнопегматоидных зон) начальная зона роста  $\alpha$ -кварц, сменяющийся  $\beta$ -кварцем с резкой границей между  $\alpha$ - и  $\beta$ -зонами, что говорит о быстрой инверсии.

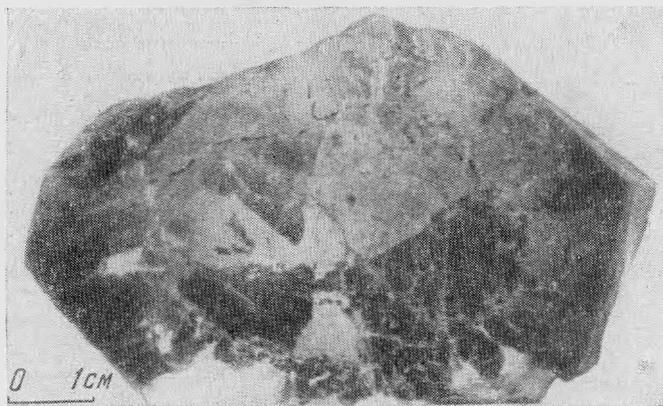


Рис. 19. Дофинейские двойники на плоскости базиса кварца в форме трехлучевой звезды — «трилистника». Мурзинка, Мокруша

Под этим углом зрения изучены кварц из пегматитов Мурзинки с горы Мокруша. Кварц жильного гранита, аплита и письменного гранита оказался типичным  $\alpha$ -кварцем с характерной трещиноватостью и типичными двойниками инверсии. Кварц из занорышей (крупные кристаллы дымчатой окраски в сростании с полевым шпатом, топазом и другими минералами) представляет собой  $\beta$ -модификацию, выросшую уже после  $\alpha$ - $\beta$ -превращения, при температуре ниже  $570-600^\circ$ . Этот кварц часто имеет зональное распределение окраски или неправильно пятнистое как бы пламеневидное. Дофинейские двойники строго приурочиваются к этим пят-

нам. На срезах  $\perp Z_3$  (по базису) наблюдается типичная фигура трилистника, характерная для низкотемпературного кварца (рис. 19). Таким образом, в пегматитах Мурзинки граница распределения  $\alpha$ - и  $\beta$ -кварца как раз совпадает с границами геофаз  $C$  и  $D$ , выделенных А. Е. Ферсманом. Кристаллизация  $\alpha$ -кварца заканчивается в геофазе  $C$  и в начале геофазы  $D$  начинает кристаллизоваться  $\beta$ -кварц.

Из пегматитов Северной Карелии нами изучено месторождение Панфилова Варака. Там наблюдается аналогичная картина — кристаллизация  $\alpha$ -кварца заканчивается с кристаллизацией графического пегматита. Кварц крупнографического (величина кварцевых востков достигает 1—3 см) и грубографического пегматита представляет собой уже  $\beta$ -модификацию, точно так же как кварц центрального кварцевого ядра.

Несколько иная картина наблюдается в пегматитах Золотой горы Борщевочного кряжа. Там кристаллизация  $\alpha$ -кварца продолжается дольше и заходит в геофазу  $D$ , что прекрасно видно на крупных образцах пегматоидного дымчатого кварца, выросшего в занорышах. Центральная часть крупных кристаллов представляет собой  $\alpha$ -модификацию (как на Волыни) с периферической зоной  $\beta$ -кварца. Наблюдаются те же типичные сотовые трещины и мелкие извилистые двойники инверсии. Граница между  $\alpha$ - и  $\beta$ -зонами — четкая и резкая, проходит параллельно граням призмы (рис. 20).

В кварце анографической структур этого же месторождения присутствуют две модификации:  $\alpha$ -кварц первичный и  $\beta$ -кварц более поздний, что и обуславливает своеобразие этих структур.



Рис. 20. Контакт  $\alpha$ - и  $\beta$ -зоны в кварце из занорыша. Борщевочный Кряж, Золотая гора. Образец В. А. Корнетовой

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенный в статье фактический материал и его обсуждение показывает, что примененными авторами методами, интерпретацией полученных реальных картин структур травления, на основе имеющихся теоретических представлений о структуре  $\alpha$ - и  $\beta$ -модификаций кварца, механизма двойникования, трещиноватости и т. д., отличие в природных зернах кварца, претерпевшего  $\alpha$ - $\beta$ -превращение от такового же не претерпевшего, является возможным и доступным. Как уже неоднократно указывалось в статье, получение таких критериев считается нами очень важным для дальнейшей работы над некоторыми вопросами генетической минералогии. Объяснение причин различия в морфологии получающихся двойников, их размерах, различия в морфологии и характере трещин и т. д., описанных детально выше, конечно, требует еще дальнейшей работы. Однако основываясь на фактических материалах и выводах, сделанных в работах Е. В. Цинзерлинг (1961<sub>1,2</sub>) и А. В. Шубникова (1940) и ряда других исследователей, а также на общетеоретических представлениях об измене-

нии структуры, плотности, объема, модуля упругости и других физических констант кварца переходе из  $\alpha$ - в  $\beta$ -модификацию, нам кажется, что ключ к объяснению лежит в следствиях разрешения механических напряжений, возникающих в связи с перестройкой структуры кварца. Широко известно, что при напряжениях, возникающих в кристаллах в связи с изменением объема, расстояния между центрами атомов могут разрешаться или без разрыва сплошности (изменением симметрии, двойникованием, или с разрывом, образующим трещины). Разрешение возникающих напряжений без разрыва сплошности путем изменения симметрии и образования сложной двойниковатости (часто субмикроскопической) при полиморфных превращениях, осуществляющихся при изменении температуры, широко известны вообще для кристаллов. Можно привести многочисленные примеры — лейцит, перовскит, ромбические пироксены (клиноэвстатит — энстатит), борацит, аргентит, возможно, гранат и многие другие многократно описанные в литературе.

Несомненно, что форма, величина возникающих в этом случае двойников, их взаимоположение в зернах зависит от направленности и ориентировки сил деформации, длительности времени разрешения деформационных напряжений и физических свойств самого вещества. Далекое не безразлично для морфологии получающихся двойников идет ли давление извне, ориентировано для индивида в целом, или оно возникает как следствие деформации во множестве точек сразу, по всей массе кристаллического зерна. В последнем случае, как мы полагаем, и создаются условия для возникновения множества деформационных центров разрешающихся в образовании мелких двойников, занимающих всю массу кристаллического зерна. Одновременно, или по достижении некоторой величины, превышающей предел упругости, возникают деформации разрыва, выражающиеся в появлении сети трещин, часто сопряженных с участками двойникования.

В генетическом отношении проведенная работа, нам кажется, особенно интересна для применения ее результатов к обнаружению отличий в различных генерациях кварца в пегматитах. Как известно, большое значение этому для объяснения генезиса пегматитов, в частности стадий, отвечающих кристаллизации графических и пегматоидных зон, придавал А. Е. Ферсман (1940). Он считал графические структуры следствием эвтектической кристаллизации пары кварц — полевошпат, выделил в своих генетических схемах ранний «серый» и «дымчатый» кварц ихтиоглиптов и зерен в пегматоидных зонах как  $\alpha$ -кварц. В своих работах, основываясь на данных Фохта по изучению возможности образования эвтектики кварц — полевошпат, а также на статистическом подсчете выдерживающихся количественных соотношениях в письменных структурах между двумя минералами, взаимной ориентировке зерен кварца и полевошпата, наличии индукционной штриховки на кварце и т. д., А. Е. Ферсман утверждал, что письменные структуры, и отчасти пегматоидные, есть структуры эвтектической кристаллизации пегматитовой расплава. Отсюда, а также из рассмотрения последовательной смены минеральных ассоциаций в ходе развития пегматита, наблюдений над определенным положением структурных зон в теле пегматитов и по ряду других соображений А. Е. Ферсман выводил доказательства для создания своей стройной теории образования пегматитов как продукта последовательной кристаллизации специализированных геохимических расплавов в замкнутой среде. Как известно, впоследствии появились возражения против теории А. Е. Ферсмана, вначале в среде американских геологов (Шеллер, Ландес и др.), а затем и у советских геологов (А. Н. Заварицкий, Д. С. Коржинский, В. Д. Никитин). Оспаривалось или начисто отрицалось происхождение графических структур за счет кристаллизации из расплава близкого к эвтектическому и выдвигались критерии, факты и соображения, заставлявшие считать пегматиты телами, образованными за счет поздних

явлений перекристаллизации и последующего метасоматического замещения минералов обычных гранитных горных пород, привнесенным веществом, передвигавшимся в растворах. Центральным пунктом доказательств в том и другом случае был вопрос о природе графических структур — что это эвтектика, или следствие более поздних процессов метасоматического замещения? Утверждения А. Е. Ферсмана и его последователей базировались на: а) закономерной взаимной ориентировке кристаллов кварца и полевого шпата, образующих эвтектические сростания; б) наблюдавшейся ориентированности удлиненных «ихтиоглиптов» кварца в письменных структурах по нормалям к определенным граням полевого шпата; в) постоянстве состава письменных гранитов, отвечавшем составу эвтектике кварц — полевой шпат; г) обрывы роста ихтиоглиптов, не доходя до периферии полевого шпата, вдоль определенных плоскостей; д) рисунке письменных структур, аналогичном рисунку заведомых кристаллизационных эвтектик.

Противники этих представлений утверждали, что строгой эпитакии между кварцем и полевым шпатом нет. Вростки кварца — «ихтиоглипты» приурочены к трещинам в полевом шпате, состав письменных пегматитов не отличается строгим постоянством. Границы обрыва ихтиоглиптов не отвечают только контурам кристаллографических плоскостей полевого шпата и, кроме того, пертитовые вростки часто пересекаются ихтиоглиптами кварца.

В последнее время ряд исследователей, особенно В. Д. Никитин (1958), произведший детальное морфологическое изучение взаимоотношений кварца и полевого шпата в письменных структурах, пришли к заключению, что генезис письменных структур связан с позднейшей собирательной кристаллизацией и перекристаллизацией кварца постмагматическими растворами вдоль трещин в микроклине, вызванных микротектоникой в определенных участках или жилах горных пород.

Как видно из сделанного краткого обзора, исследователи, утверждавшие эвтектическую природу основных структур пегматитов и их противники, пользовались только относительными критериями, вытекавшими из фиксации морфологических признаков и взаимоотношений между зернами кварца и полевого шпата в структурах, или косвенными доказательствами и сопоставлениями аналогий в отношении механики кристаллизации, температуры и фазового состояния минералообразующей среды. Нет прямых доказательств кристаллизации кварца ихтиоглиптов так же и из гидротермального раствора путем метасоматоза или перекристаллизации. Нет так же прямых доказательств и у А. Е. Ферсмана и его последователей, утверждающих кристаллизацию кварца «ихтиоглиптов» и других структур (иногда вплоть до кварцевого ядра) из пегматитового кварц-полевошпатового расплава. Между тем этим прямым доказательством является принадлежность того или иного кварца в той или иной структурной зоне пегматита к первично  $\alpha$ - или  $\beta$ -модификации. При применении полученных нами данных для отличия, как показано в этой статье на конкретном фактическом материале, в письменных структурах мы имеем действительно первично  $\alpha$ -кварц, т. е. кварц, кристаллизовавшийся во всяком случае выше температуры  $573^\circ$ . Этот факт позволяет нам сделать определенные и однозначные выводы относительно генезиса и температур образования графических, части пегматоидных и зернистых структур (в том числе аплитовидных), характерных для первых стадий кристаллизации гранитных пегматитов, и подтвердить наличие эвтектической кристаллизации из расплава, а следовательно, и происхождение большинства пегматитовых тел как продукт последовательной кристаллизации из обособившегося расплава.

В самом деле, по имеющимся экспериментальным данным (Ингерсон, 1958) кристаллизация сухой эвтектики кварц — ортоклаз — альбит отве-

чает температуре  $937^{\circ}$ . Та же система с водой (при  $p_{H_2O}$  порядка  $1000 \text{ атм}$ ) кристаллизуется при температуре  $750^{\circ}$ . Последняя система с точки зрения имеющихся представлений о главном составе пегматитового расплава, очевидно, ближе всего отвечает природным условиям. Считается, что большинство пегматитовых тел образуется на глубинах порядка  $5 \text{ км}$ , т. е. при давлениях, отвечающих примерно  $1500 \text{ атм}$ .

Точка инверсии  $\alpha$ - $\beta$ -кварца, как сказано выше,  $573 \pm 2^{\circ}$  при  $1 \text{ атм}$ . Наблюдавшееся расхождение температуры инверсии связано с вхождением примесей (главным образом Al, Li, Ge), причем для природных кварцев, содержащих лишь незначительные примеси, эти колебания не превышают максимум в  $\pm 3^{\circ}$ , и только в искусственных кристаллах с присадкой больших количеств Al, Li, Ge достигали порядка десятков и иногда  $120^{\circ}$  (Кейт и др., 1954). С повышением давления точка инверсии закономерно повышается примерно на  $2^{\circ}$  на каждые  $100 \text{ атм}$ . Экспериментальные исследования Иодера (1954) показали, что при  $1000 \text{ атм}$  температура инверсии равна  $599^{\circ}$ ,  $2000 \text{ атм}$  —  $626^{\circ}$ ,  $3000 \text{ атм}$  —  $653^{\circ}$ . Это примерно соответствует глубине в 3, 7 и  $10 \text{ км}$ . Как уже указано выше, примерная глубина образования пегматитов принимается равной  $5 \text{ км}$ , т. е. точка инверсии кварца на этих глубинах должна отвечать  $610$ — $620^{\circ}$ . Если сравним эту температуру с температурой кристаллизации эвтектики кварц — полевой шпат в присутствии водяных паров ( $750^{\circ}$ ), то увидим достаточно ясно, что кристаллизация этой эвтектики должна происходить с образованием  $\alpha$ -кварца даже и при значительно больших давлениях. Как уже указывалось, это вполне соответствует фактам, полученным нами экспериментально для кварцев графических зон и отчасти для начала роста кварца в занорышах во всех типах пегматитов (I, IV тип, по Ферсману), в которых мы имеем продукты первичной кристаллизации начальных стадий формирования пегматитов. Это не значит, конечно, что следует полностью отрицать развитие явлений метасоматоза, замещений и т. д. на последних стадиях формирования пегматитовых образований, или на широкое их развитие в ряде типов редкометалльных пегматитов. Это не отрицает и достаточно ясно объясняет и теория А. Е. Ферсмана, но во всех этих последующих образованиях мы будем иметь дело уже с изначально  $\beta$ -кварцем, что и подтверждается нашими данными. Выше показано, что кристалл в занорышах может начать расти как  $\alpha$ -модификация и закончить свой рост как  $\beta$ , т. е. процесс перехода от двухфазовой системы расплав — твердый минерал к более сложным трехфазовым с участием надкритических растворов развивается постепенно, в последовательной смене кристаллизации при охлаждении сложной системы пегматитового расплава. Более того, нам кажется, что в результате процессов метасоматоза, перекристаллизации, замещения могут образоваться и псевдографические структуры (апографика и др.), но их следует строго отличать от настоящей графика письменных зон и критерием различия, безусловно, является наличие или отсутствие  $\alpha$ -кварца. Нам кажется, что полученные результаты однозначно решают указанные выше дискуссионные вопросы и требуют дальнейшей работы по накоплению фактического материала, устанавливающего развитие  $\alpha$ - или  $\beta$ -кварца в разных зонах гранитных пегматитов. В заключение нам хочется отметить, что обобщения, сделанные А. Е. Ферсманом, выдерживают проверку и подтверждаются предлагаемыми нами непосредственными критериями более точного характера. Общая схема, данная для пегматитов А. Е. Ферсманом, оказывается справедливой и нет сомнения, что настоящие графические структуры — это структуры одновременной кристаллизации кварца и полевого шпата из расплава по принципу эвтектики и при температурах выше точки  $\alpha$ - $\beta$ -превращения кварца.

- Белов Н. В. Структуры ионных кристаллов и металлических фаз. Изд-во АН СССР, 1947.
- Веденеева Н. Е. К вопросу о природе окраски аметиста.— Труды Лаб. крист., АН СССР, 1940, вып. 2.
- Веденеева Н. Е., Ченцова Л. Г. Исследование природы дымчатой окраски кварца.— Труды Ин-та крист., АН СССР, 1952, вып. 7.
- Вировлянский Г. М. Кварц как геологический термометр.— Зап. Всес. мин. об-ва, 1938, ч. 76, сер. 2, № 3.
- Григорьев Д. П. О различии первичных и вторичных жидких включений в минералах.— Мин. сб. Львовск. геол. об-ва, 1948, № 2.
- Григорьев Д. П. О проявлении спайности в природе.— Зап. Всес. мин. об-ва, 1958, ч. 87, вып. 4.
- Долгов Ю. А. О «высокотемпературном» ромбоэдрическом облике кристаллов кварца.— Мин. сб. Львов, ун-та, 1954, № 11.
- Ермаков Н. П. Исследование минералообразующих растворов. Харьков, 1950.
- Зубов В. Г., Фирсова М. М. Об упругих свойствах высокотемпературного кварца.— Докл. АН СССР, 1956, 109, № 3.
- Ингерсон Э. Методы и проблемы геологической термометрии.— В сб. «Проблемы рудных месторождений». М., Изд-во иностр. лит-ры, 1958.
- Иодер Х. С. Полиморфное превращение кварца при давлении до 10 000 бар.— В сб. «Экспериментальные исследования в области петрографии и рудообразования». М., Изд-во иностр. лит-ры, 1954.
- Карякин А. Е. О связи качества кристаллов с их внешним обликом.— Зап. Всес. мин. об-ва, 1948, ч. 74, вып. 4.
- Кейт М. А., Гатт О. Ф. Значение изменения точки превращения кварца.— В сб. «Экспериментальные исследования в области петрографии и рудообразования». М., Изд-во иностр. лит-ры, 1954.
- Классен-Неклюдова М. В. Механическое двойникование кристаллов. Изд-во АН СССР, 1961.
- Леммлейн Г. Г. Залечивание трещин и образование вторичных жидких включений.— Докл. АН СССР, 1929, № 6.
- Леммлейн Г. Г. 1. О закономерных сростаниях порфировых вкрапленников кварца.— Докл. АН СССР, 1930, сер. А, № 13.
- Леммлейн Г. Г. 2. Коррозия и регенерация кварцевых вкрапленников в кварц-порфирах.— Докл. АН СССР, 1930, сер. А, № 13.
- Леммлейн Г. Г. О взаимодействии сростающихся кристаллов порфирового кварца.— Труды Ин-та крист. АН СССР, 1948, вып. 4.
- Леммлейн Г. Г. О соотношении современного и первоначального объемов жидких включений в минералах.— Докл. АН СССР, 1950, 72, № 4.
- Леммлейн Г. Г. Распределение окраски в кристаллах кварца.— Труды Ин-та крист. АН СССР, 1951, вып. 6.
- Леммлейн Г. Г. Спектрофотометрическое исследование окрашенных кварцев.— Труды Ин-та крист. АН СССР, 1951, вып. 6.
- Леммлейн Г. Г. К теории залечивания трещин в кристалле и о равновесной форме отрицательного кристалла.— Докл. АН СССР, 1953, 89, № 2.
- Леммлейн Г. Г. Самозалечивание трещин в кристалле.— Труды Ин-та крист. АН СССР, 1954, вып. 10.
- Леммлейн Г. Г. Образование жидких включений в минералах и их применение в геологической термометрии.— Геохимия, 1956, № 6.
- Леммлейн Г. Г. Преобразование формы жидких включений при изменении температуры.— Кристаллография, 1958, 3, вып. 2.
- Леммлейн Г. Г. Классификация жидких включений в минералах.— Зап. Всес. мин. об-ва, 1959, ч. 88, вып. 2.
- Леммлейн Г. Г., Клия М. О. 1. Новые данные об отложении вещества кристалла на стенках полости жидкого включения.— Докл. АН СССР, 1952, 82, № 5.
- Леммлейн Г. Г., Клия М. О. 2. Особенности залечивания трещин в кристаллах в режиме снижающейся температуры.— Докл. АН СССР, 1952, 87, № 6.
- Леммлейн Г. Г., Клия М. О. Изменения формы жидких включений под влиянием временного перегрева кристалла.— Докл. АН СССР, 1954, 94, № 2.
- Леммлейн Г. Г., Клия М. О., Островский И. А. Об условиях образования минералов в пегматитах по данным изучения первичных включений в топазе.— Докл. АН СССР, 1962, 142, № 1.
- Леммлейн Г. Г., Клевцов П. В. Физико-химический анализ жидких включений кварца, содержащих кристаллики NaCl, KCl.— Зап. Всес. мин. об-ва, 1955, ч. 84, вып. 1.
- Маслова И. Н. Ультрамикроскопическое исследование жидкой и газовой фаз двухфазных включений Вольни.— Геохимия, 1961, № 2.
- Малхасян Э. Г. Низкотемпературный дигризмальный кварц из Барабатумской серии порфиров.— Зап. Арм. отд. ВМО, 1959, вып. 1.

- Никитин В. Д. Строение и генезис письменных гранитов в пегматитовых жилах.— Зап. Ленингр. горн. ин-та, геол., 1958, 33, вып. 2.
- Пап А. М. Дипирамидальный кварц из месторождения Бастой.— Труды Всес. Магадан. НИИ, геол., 1956, № 1.
- Смирнов С. С. О дипирамидальном кварце из Тетюхинского свинцово-цинкового месторождения.— Зап. Всес. мин. об-ва, 1947, ч. 76, вып. 4.
- Смит Ф. С. Геологическая термометрия по включениям в минералах. М., Изд-во иностр. лит-ры, 1956.
- Ферсман А. Е. О кварце из гранит-порфиров о. Эльба. VI серия, 1903, 3 № 17.
- Ферсман А. Е. К вопросу о природе кварца из гранит-порфиров. 1913, VI серия, XII, № 17.
- Ферсман А. Е. Пегматиты, т. 1. Изд-во АН СССР, 1940.
- Франк-Каменецкий В. А., Шафрановский И. И. По поводу кубических кварцев.— Зап. Всес. мин. об-ва, 1960, ч. 89, вып. 4.
- Хлапов А. И. Рентгенографические данные о фазовом переходе  $\alpha$ - $\beta$ -кварца.— Кристаллография, 1962, 7, вып. 4.
- Цинзерлинг Е. В. Искусственное двойникование кварца при наличии в нем бразильских двойников.— Труды Ин-та крист. АН СССР, 1956, вып. 12.
- Цинзерлинг Е. В. 1. Возможно ли получить в кварце искусственный японский двойник.— Зап. Всес. мин. об-ва, 1961, ч. 90, вып. 5.
- Цинзерлинг Е. В. 2. Искусственное двойникование кварца. Изд-во АН СССР, 1961.
- Цинзерлинг Е. В. Фигуры травления в кварце.— Кристаллография, 1963, 8, вып. 1.
- Цинобер Л. И., Ченцова Л. Г. Синтетический кварц с аметистовой окраской.— Кристаллография, 1959, 4, вып. 4.
- Цинобер Л. И., Ченцова Л. Г. К вопросу о природе дымчатой окраски в кристаллах синтетического кварца.— Кристаллография, 1963, 8, вып. 2.
- Ченцова Л. Г. К вопросу о природе красящих центров в решетке кварца.— Кристаллография, 1956, 1, вып. 4.
- Ченцова Л. Г., Веденеева Н. Е. Связь явлений ионной электропроводности с явлениями окрашивания в дымчатом кварце.— Труды Ин-та крист. АН СССР, 1952, вып. 7.
- Элинсон М. М., Полюковский В. С. Некоторые особенности процесса формирования хрусталеносных пегматитов по данным изучения газового состава включений в минералах и горных породах.— Геохимия, 1961, № 10.
- Шубников А. В. Кварц и его применение. Изд-во АН СССР, 1940.
- Яковлев И. А. Молекулярное рассеяние света при  $\alpha$ - $\beta$ -превращении кварца.— Кристаллография, 1956, 1, вып. 1.
- Bloss F. D. Anisotropy of fracture in quartz. — Amer. J. Sci. 1957, 225, № 3.
- O'Brien G. M. The structure of the colour centres in smoky quartz.— Proc. Roy. Soc. A, 1955, 231.
- La Chatelier H. Sur la dilatation du quartz.— Bull. Soc. franç. minéral. et crystallogr., 1890, 13, Paris.
- Dana J. D. The system of mineralogy. N. Y., 1910.
- Fairbairn H. W. Correlation of quartz deformation with its crystal structure.— Amer. Mineralogist, 1939, 24, № 6.
- Fron del C. Silica Minerals. The system of mineralogy, v. VIII. 7th ed. N. Y., 1962.
- Kozu S. Japanese twins of quartz.— Amer. J. Sci., Bowen vol., 1952.
- Mügge. Zwillingsbau magmatischer Quarze.— Z. Kristallogr., 1933, 84.
- Rinne F., Koll R. Geometrisches zur Modifikationsänderung von  $\alpha$ -in  $\beta$ -quartz.— Zbl. Mineral., 1911, № 3.
- Rosenbush H. Mikroskopische Physiographie der petrographisch wichtigen Mineralien. Stuttgart, 1925.
- Slavik F. Bemerkungen über der Quartz-Porphyr unter dem Kasakow Berge, № 1. N. J., 1902.