

УДК 549.514.51:537.533

МИНЕРАЛОГИЯ

В. Е. СОНЮШКИН, М. И. ИЛЬИН

**ОБ ОТЛИЧИИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО  $\alpha$ -КВАРЦА  
ОТ ПАРАМОРФОЗ  $\alpha$ - ПО  $\beta$ -КВАРЦУ  
(ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ)**

*(Представлено академиком А. В. Сидоренко 2 VIII 1974)*

Один из приемов минералогической термометрии заключается в использовании температур полиморфных переходов. Особый интерес с этой точки зрения представляют полиморфные модификации кварца: низкотемпературная, тригональная ( $\alpha$ -кварц) и высокотемпературная, гексагональная ( $\beta$ -кварц). Температура  $\alpha$ - $\beta$ -перехода соответствует  $573 \pm 2^\circ$  при давлении 1 атм.; при повышении давления на каждую 1000 атм. эта температура увеличивается на  $20-22^\circ$  <sup>(3)</sup>. Однако использование  $\alpha$ - и  $\beta$ -кварца в минералогической термометрии сопряжено с некоторыми сложностями, заключающимися в том, что в приповерхностных условиях  $\beta$ -кварц неустойчив, и поэтому в обнажениях мы имеем дело не с высокотемпературным  $\beta$ -кварцем, а с параморфозами  $\alpha$ - по  $\beta$ -кварцу, которые трудно отличить от первично-низкотемпературного  $\alpha$ -кварца.

Существующие методы отличия  $\alpha$ -кварца от параморфоз  $\alpha$ - по  $\beta$ -кварцу, основанные на данных световой оптики <sup>(1)</sup> и и.-к. спектроскопии <sup>(2)</sup>, не позволяют исследовать отдельные микрозерна этого минерала, входящие в состав разнообразных горных пород различных типов.

Для нахождения объективных критериев отличия на микроуровне нами было произведено сравнительное электронно-микроскопическое изучение  $\alpha$ -кварца хрусталеносных жил Приполярного Урала и вкрапленников из кварцевых порфиров Закавказья (Кафан, Самшвилдо), представленных параморфозами  $\alpha$ - по  $\beta$ -кварцу. Исследования велись на растровом электронном микроскопе (РЭМ) «Стереоскан», оснащенный блоком для рентгеноспектрального микроанализа, и на просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) ЕМ-802. Для наблюдений в РЭМ изучаемая поверхность покрывалась в вакууме проводящей пленкой серебра. Для уменьшения поглощения рентгеновского излучения при работе в режиме микроанализа использовалось покрытие углеродом. Исследования в ПЭМ проводились методом самооттененных угольных реплик.

В основу нахождения достоверного критерия отличия  $\alpha$ -кварца от параморфоз  $\alpha$ - по  $\beta$ -кварцу были положены представления о секториальном строении кристаллов <sup>(4)</sup>. Согласно этим представлениям, почти весь объем  $\alpha$ -кварца складывается пирамидами роста  $\langle 10\bar{1}1 \rangle$  и  $\langle 01\bar{1}1 \rangle$ , которые соответствуют двум различным простым формам кварца — положительному  $\{10\bar{1}1\}$  и отрицательному  $\{01\bar{1}1\}$  ромбоэдрам и различаются по ряду свойств, в частности по содержанию примесей. В противоположность этому, в кристаллах  $\beta$ -кварца пирамиды роста  $\langle 10\bar{1}1 \rangle$  и  $\langle 01\bar{1}1 \rangle$  не различаются по свойствам, так как принадлежат одной простой форме — гексагональной дипирамиде  $\{10\bar{1}1\}$ . Секториальное строение  $\alpha$ -кварца осложняется присутствием дофинейских двойников роста, в которых пирамиды  $\langle 10\bar{1}1 \rangle$  и  $\langle 01\bar{1}1 \rangle$  взаимно проникают друг в друга, за счет чего двойниковые границы являются одновременно и границами пирамид роста, различающихся по

содержанию примесей. В параморфозах  $\alpha$ - по  $\beta$ -кварцу всегда присутствуют вторичные дофинейские двойники инверсии, в которых участки по разные стороны границы не различаются по содержанию примесей.

Нами исследовались в РЭМ дофинейские двойники роста в пирамидах нарастания положительного  $\{10\bar{1}1\}$  и отрицательного  $\{01\bar{1}1\}$  ромбоэдров  $\alpha$ -кварца и дофинейские двойники инверсии в пирамидах нарастания гексагональной дипирамиды  $\{10\bar{1}1\}$ , слагающих параморфозы  $\alpha$ - по  $\beta$ -кварцу. Для выявления двойникового строения поверхности образцов травилась 40 % HF в течение 2—4 час. Наиболее четко двойниковая граница видна на плоскостях ромбоэдров за счет различия фигур травления, принадлежащих положительному  $\{10\bar{1}1\}$  и отрицательному  $\{01\bar{1}1\}$  ромбоэдрам (рис. 1а и рис. 2а). Для непосредственного выявления примесей были сняты кривые распределения Al по линиям, пересекающим границы двойников роста и инверсии (рис. 1б и рис. 2б). Кривая на рис. 1б свидетельствует о различном содержании Al в пирамидах  $\langle 10\bar{1}1 \rangle$  и  $\langle 01\bar{1}1 \rangle$  по разные стороны границы дофинейского двойника роста  $\alpha$ -кварца. Одинаковый уровень распределения Al на рис. 2б соответствует дофинейскому двойнику инверсии в параморфозе  $\alpha$ - по  $\beta$ -кварцу.

Таким образом, различное содержание примесей по разные стороны двойниковой границы говорит о том, что мы имеем дело с дофинейским двойником роста, и полученные данные являются надежным критерием того, что кварц кристаллизовался при температуре ниже точки инверсии. Одинаковое содержание примесей по разные стороны границы двойника не может служить точным критерием образования данного кварца в виде его  $\beta$ -модификации, так как разница в концентрациях примесей в пирамидах  $\langle 10\bar{1}1 \rangle$  и  $\langle 01\bar{1}1 \rangle$   $\alpha$ -кварца может быть ниже чувствительности прибора. В этом случае нужны дополнительные критерии, подтверждающие природу кварца.

Одним из таких критериев является морфология первичных включений минералообразующей среды, имеющих форму отрицательных кристаллов. Ограниченные полости включений в тригональном  $\alpha$ -кварце характеризуются тригональной симметрией. В параморфозах  $\alpha$ - по  $\beta$ -кварцу симметрия полостей включений соответствует гексагональной симметрии  $\beta$ -кварца.

В ПЭМ на репликах со сколов  $\alpha$ -кварца нами были выявлены полости включений в виде отрицательных кристаллов тригональной симметрии. Среди элементов ограничения одной из таких полостей (рис. 3а) можно различить грани положительного  $\{10\bar{1}1\}$  и отрицательного  $\{01\bar{1}1\}$  ромбоэдров и гексагональной призмы  $\{10\bar{1}0\}$ . Совершенно ровная, без следов залечивания поверхность скола вокруг вскрытой полости говорит о первичном характере данного включения.

Гексагональная симметрия полостей включений в параморфозах  $\alpha$ - по  $\beta$ -кварцу хорошо видна на сечениях по плоскостям пинакоида  $\{0001\}$ , где включения имеют форму правильных шестиугольников. Так как полости включений в изучавшихся пирогенных кварцах почти нацело заполнены стеклом, то для их выявления в РЭМ исследуемая поверхность травилась 5—10 % HF в течение 5—10 мин. Вскрытая травлением полость включения гексагональной симметрии приведена на рис. 3б. Небольшое искажение формы включения связано с отклонением ориентировки изучаемого сечения от плоскости  $\{0001\}$ .

Дополнительным критерием, позволяющим устанавливать, подвергался ли данный кварц  $\beta$ — $\alpha$ -переходу или нет, являются трещины инверсии. Возникновение таких трещин связывают с перераспределением внутренних напряжений при перестройке гексагональной структуры  $\beta$ -кварца в тригональную <sup>(3)</sup>. При помощи оптического микроскопа было установлено <sup>(4)</sup>, что рисунок трещин инверсии в параморфозах  $\alpha$ - по  $\beta$ -кварцу складывается из кривых линий, образующих ячеистый узор вне зависимости от кристаллографических направлений, в то время как трещины хрупкой деформации в  $\alpha$ -кварце имеют прямолинейные или ломаные очертания.

Для выявления микротрещин инверсии в РЭМ поверхность исследуемых образцов предварительно травилась 10% HF в течение 2–3 час. При этом травление шло только по микротрещинам, и они четко выделялись в виде каналов, пересекающихся с образованием ячеистого узора (рис. 4).

Полученные на основе электронно-микроскопических данных критерии позволяют отличать  $\alpha$ -кварц от параморфоз  $\alpha$ - по  $\beta$ -кварцу на уровне микророзерен, что невозможно было сделать ранее из-за ограничений применявшихся методов исследования.

В заключение считаем своим долгом выразить благодарность Г. С. Грицаенко за общее руководство работой, Д. П. Григорьеву — за обсуждение полученных результатов и Ю. В. Малову — за ряд ценных советов.

Геологический институт  
Академии наук СССР  
Москва

Поступило  
24 VII 1974

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> Г. П. Барсанов, Э. Я. Гурьева, ДАН, т. 153, № 4, 909 (1963). <sup>2</sup> М. С. Гасоян, Изв. АН СССР, сер. геол., № 2, 82 (1971). <sup>3</sup> Дж. Дэна, Э. С. Дэна, К. Фрондель, Система минералогии, т. 3, Минералы кремнезема, М., «Мир», 1966. <sup>4</sup> Г. Г. Леммлейн, Секторвальное строение кристалла, М.—Л., Изд. АН СССР, 1948. <sup>5</sup> Е. В. Цинзерлинг, Искусственное двойникование кварца, М., Изд. АН СССР, 1961.

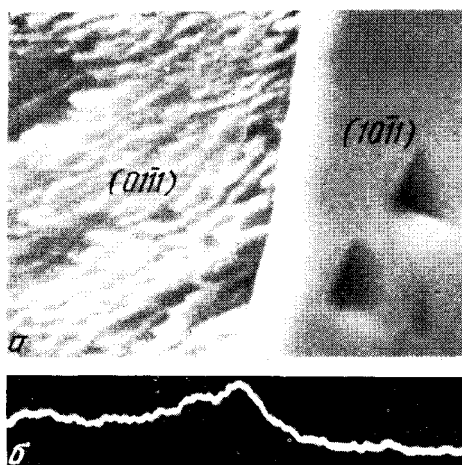


Рис. 1

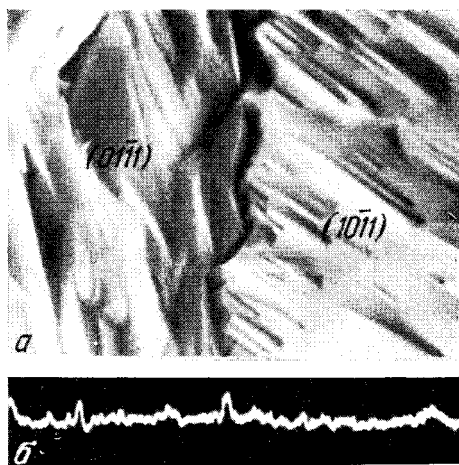


Рис. 2

Рис. 1. *a* — дофннейский двойник роста  $\alpha$ -кварца, изображение во вторичных электронах (2000 $\times$ ); *b* — кривая распределения Al с того же участка

Рис. 2. *a* — дофннейский двойник инверсии в параморфозе  $\alpha$ - по  $\beta$ -кварцу, изображение во вторичных электронах (2000 $\times$ ); *b* — кривая распределения Al с того же участка

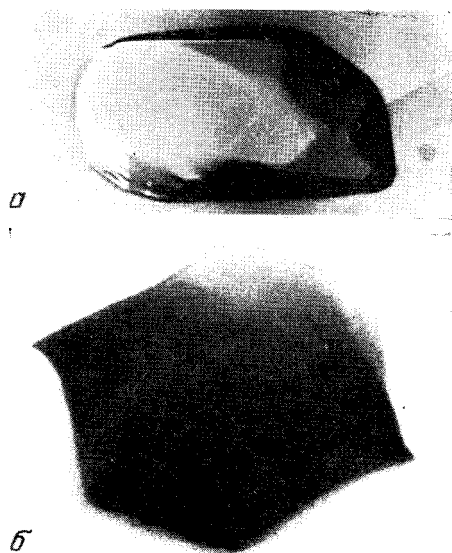


Рис. 3



Рис. 4

Рис. 3. *a* — ограниченная полость газожидкого включения в  $\alpha$ -кварце, самооттепленная углеродная реплика (7000 $\times$ ); *b* — включение стекла в параморфозе  $\alpha$ - по  $\beta$ -кварцу, изображение во вторичных электронах (5000 $\times$ )

Рис. 4. Трещины инверсии в параморфозе  $\alpha$ - по  $\beta$ -кварцу, изображение во вторичных электронах (500 $\times$ )



Рис. 1. Первичные включения расплавов в лейцитах лейцититов вулкана Везувий (157 $\times$ ). а — зональные раскристаллизованные включения I генетического типа; б — зональные однофазовые включения II генетического типа; в — д — частично раскристаллизованные включения.

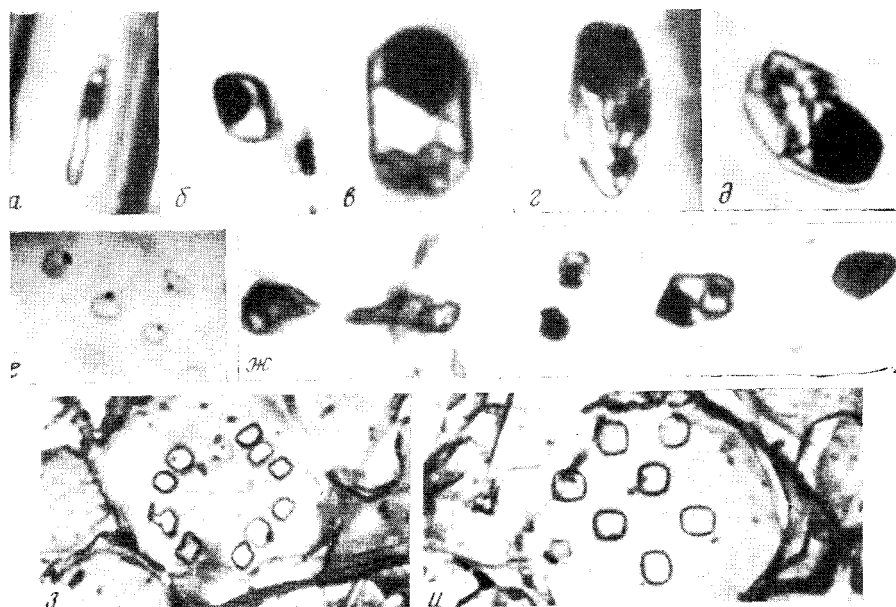


Рис. 2. Включения расплавов в минералах вайомангита (157 $\times$ ). а — е — включения расплава в биотите: а — первичное двухфазовое, б — первичное трехфазовое, в — д — первичные многофазовые, е — минимоторичные; ж — первичные включения в пироксене; з, и — первичные, зональные включения в лейците.