Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т. LXXIУ, вып. 2, 1977 г.

ПРИНЦИПЫ АНАЛИТИЧЕСКОГО ВЫРАЖЕНИЯ АНАТОМИИ КРИСТАЛЛОВ (ПРИ МЕНЯЮЩИХСЯ УСЛОВИЯХ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ)

В.Ю.ЭШКИН, Т.А.КАРЯКИНА

Физико-химические условия минералообразования в природных условиях редко остаются постоянными, испытывая постепенные либо пульсационные изменения, что находит свое отражение в зональном и секториальном строениях индивидов. При этом их разновозрастные части и пирамиды роста различных граней отличаются типом и распространенностью дефектов, в связи с чем они могут иметь неравноценное (особенно для монокристального сырья) значение. Поэтому изучение анатомии кристаллов, в понимании Д.П.Григорьева [I], представляется необходимым не только для восстановления условий и закономерностей их формирования, но и для оценки качества сырья как в пределах отдельных кристаллов, так и месторождений в целом.

Изменения физико-химических условий минералообразования прежде всего вызывают отличия соседних зон роста кристаллов, фиксируемые по изменению окраски, состава структурных примесей, структуре и другим физическим и химическим свойствам. Более резкие смены условий сказываются на скорости роста различных граней, т.е. вызывают изменения секториального строения кристаллов. Таким образом, число и тип пирамид нарастания определяются числом растущих в соответствующий момент времени граней кристалла. Грани торможения, имеющие нулевую нормальную скорость роста, но часто принадлежащие главным габитусным формам кристалла, собственных пирамид роста не образуют.

Форма пирамид нарастания и в определенной мере их размеры зависят от соотношения скорости роста соседних граней кристалла.

Зональное и секториальное строения кристаллов устанавливаются обычно на специально приготовленных препаратах (срезах или тонких пластинках), выпиленных из кристаллов с учетом их внешней огранки и симметрии. При этом анатомия кристаллов лишь в отдельных случаях может быть заметна в естественном состоянии, чаще образцы подвергаются предварительной обработке (облучению, травлению) или требуют применения специальных лабораторных методов исследований.

Следует иметь в виду, что как физические, так и химические исследования кристаллов должны проводиться с учетом их внутреннего строения; это

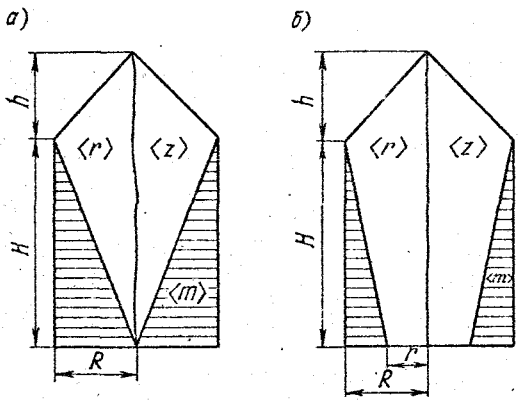


Рис. 1. Схемы строения кристаллов кварца, сложенных пирамидами ⟨r⟩, ⟨z⟩, ⟨m⟩ и сформировавшихся при постоянных условиях минералообразования

особенно важно при использовании в минералогических исследованиях тонких и высокочувствительных физических методов. Указанные обстоятельства выдвигают в качестве первоочередной задачи разработку методов не только графического (геометрического) анализа анатомии кристаллов, но также основы аналитического ее выражения.

Рассмотрим особенности зонального и секториального строений кристаллов и способы ее выражения на примере кварца.

Кристаллы кварца сложены преимущественно пирамидами роста основных ромбоэдров ⟨r⟩ и ⟨z⟩ в сочетании с пирамидами роста граней гексагональной призмы ⟨m⟩ (рис. I) и острейших ромбоэдров. Анатомию кварца удобнее всего изучать в срезах, параллельных оси третьего порядка.

Объем кристалла равен сумме объемов пирамид его нарастания:

$$V_{Кр} = V_{\langle m\rangle} + V_{\langle r\rangle} + V_{\langle z\rangle} .$$

или в упрощенном виде

$$V_{Кр} = \langle r\rangle + \langle z\rangle + \langle m\rangle .$$

На схеме кристаллы, сложенные одноименными пирамидами роста, отличаются друг от друга формой и относительными размерами этих пирамид, что связано с различием в соотношении скоростей нарастания граней.

Объективные (количественные) данные, позволяющие судить об отличии секториального строения индивидов, можно получить, подсчитав относительные объемы, приходящиеся на каждую пирамиду роста, если объем всего индивида принять за 100.

Объемы пирамид роста можно рассчитать на основании формул стереометрии. Так, для кристаллов кварца гексагонально-призматического габитуса

$$V_{Кр} = 2R^2\sqrt{3}\left(H+\frac{1}{3}h\right);$$

$$V_{\langle r\rangle,\langle z\rangle} = \frac{\sqrt{3}}{9}\left[hR^2+H(R^2+rR+r^2)\right];$$

$$V_{\langle m\rangle} = \frac{\sqrt{3}}{9}H(2R^2-rR-r^2) .$$

Таким образом, после подсчета относительных значений объемов пирамид роста формулы секториального строения кристаллов будут иметь вид:

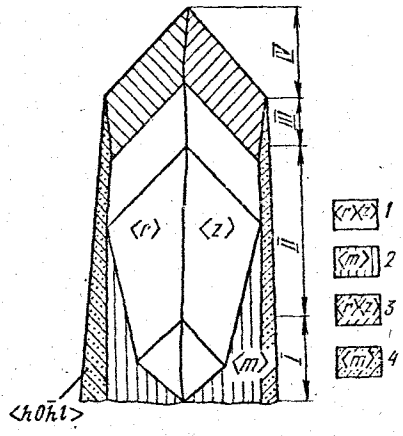


Рис.2. Схема секториального строения кристалла, сформировавшегося при меняющихся условиях минералообразования
I-IУ – периоды роста кристалла
1, 2 – первая генерация; 3-4 – вторая генерация

для схемы рис.I, а

$$\langle r\rangle_{20,6} + \langle z\rangle_{20,6} + \langle m\rangle_{58,8} \ ;$$

для схемы рис.I, б

$$\langle r\rangle_{31,6} + \langle z\rangle_{31,6} + \langle m\rangle_{36,8} \ .$$

В рассмотренных примерах секториальное строение кристаллов на протяжении всего периода их роста оставалось неизменным. Смена условий минералообразования отражается в секториальном строении индивидов, что выражается в изменении соотношения скоростей роста граней и в появлении или исчезновении пирамид роста граней призмы и тех или иных граней острейших ромбоэдров (рис.2).

В связи с этим целесообразно кристалл или его часть, сложенную пирамидами нарастания с постоянными или закономерно меняющимися соотношениями скоростей роста граней, выделять как период роста кристалла. По этому определению кристаллы, изображенные на рис.I, соответствуют одному периоду роста, а на кристалле, изображенном на рис.2, можно выделить четыре периода (I-III соответствуют первой генерации, IУ – второй) [5].

Возможная форма границы между пирамидами нарастания граней соответствует трем типам поверхностей, выделенных Г.Г.Леммлейном [3]. Однако из-за того, что процесс роста имеет ритмичный, пульсационный характер [4], в частности выражающийся в зональном строении кристаллов, граница между пирамидами роста (даже в пределах отдельного периода) ступенчатая.

Итак, если секториальное строение периода роста представить в виде суммы объемов пирамид роста, относящихся к этому периоду, то секториальное строение кристалла, в котором выделено несколько периодов роста, можно записать как сумму этих периодов.

Однако простое выделение периодов и генераций, так же как и пирамид роста, для полной характеристики анатомии индивида бывает недостаточно, особенно в тех случаях, когда различные пирамиды, периоды или генерации имеют разное практическое значение. Поэтому более полное представление об анатомии индивида дает такое выражение его секториального строения, в котором будет отражен относительный объем, занимаемый в них каждым периодом или генерацией.

Тогда в общем виде формула анатомии кристаллов при меняющихся условиях минералообразования будет иметь вид

$$\underbrace{\underbrace{\left\{\left[\langle A\rangle_a + \langle B\rangle_b + \langle C\rangle_c\right]_d \rightarrow \underbrace{\left[\langle C\rangle_f + \langle D\rangle_g\right]_k}_{\text{II период}}\right\}_t}_{\text{Первая генерация}} \longrightarrow \underbrace{\left\{\left[\langle A\rangle_m + \langle E\rangle_n\right]\right\}_p}_{\text{Вторая генерация}}}_{\text{I период}} , \qquad (I)$$

где A, B, C, D, E – пирамиды роста граней; a, b, c, f, g, m, n – объемы пирамид нарастания кристалла, %; $a + b + c = 100$, $f + g = 100$, $m + n = 100$; d и k – объемы кристалла соответственно I и II периода первой генерации; $d + k = 100$; l и p – объемы кристалла соответственно первой и второй генерации; $l + p = 100$; стрелкой показана смена периодов и генерации.

Тогда образование кварца первой генерации (рис.2) можно разделить на три периода:

в I период формирование индивида шло за счет пирамид роста граней призмы и основных ромбоэдров с соотношением их скоростей нарастания $C_r/C_m = 1$:

$$[\langle r\rangle_{25} + \langle z\rangle_{25} + \langle m\rangle_{50}] \quad ; \qquad (2)$$

во II период изменяются соотношения скоростей роста граней r, z и m до 3, доля $\langle m\rangle$ в построении индивидов соответственно резко уменьшается:

$$[\langle r\rangle_{31} + \langle z\rangle_{31} + \langle m\rangle_{38}] \; ; \qquad (3)$$

в III период формирование индивида продолжается за счет отложения вещества на гранях r и z :

$$[\langle r\rangle_{50} + \langle z\rangle_{50}] \; . \qquad (4)$$

На этом кристаллизация кварца первой генерации заканчивается.

Кварц второй генерации нарастает непосредственно на кристаллы первой генерации, образуя с ними единый индивид; эта часть кристалла сложена пирамидами роста острых и основных ромбоэдров:

$$\{[\langle r\rangle_{25} + \langle z\rangle_{25} + \langle h0\bar{h}l\rangle_{25} + \langle 0h\bar{h}l\rangle_{25}]\} . \qquad (5)$$

Используя формулы (2)–(5), анатомию кристалла можно записать в следующем виде:

$$\{[\langle r\rangle_{25} + \langle z\rangle_{25} + \langle m\rangle_{50}]_{7,5} \longrightarrow [\langle r\rangle_{31} + \langle z\rangle_{31} + \langle m\rangle_{38}]_{69} \longrightarrow$$

$$\longrightarrow [\langle r\rangle_{50} + \langle z\rangle_{50}]_{23,5}\}_{61} \longrightarrow \{[\langle r\rangle_{25} + \langle z\rangle_{25} + \langle h0\bar{h}l\rangle_{25} + \langle 0h\bar{h}l\rangle_{25}]\}_{39} . \qquad (6)$$

Для ряда южноуральских месторождений характерно, что кварц второй генерации интенсивно сдвойникован по бразильскому закону и, следовательно, полностью непригоден для изготовления пьезооптических изделий [5]. В рассмотренном примере эта генерация кварца составляет 39% от всего объема кристалла.

Распределение кристаллизационных дефектов во всех случаях подчиняется законам анатомии [2]. Размеры дефектных областей, как видно из разобранного примера, можно определить непосредственно из формул секториального

строения (I)–(6). Несколько сложнее обстоит вопрос с подсчетом областей, занимаемых наследуемыми дефектами, в частности мозаичностью.

Разберем это на примере кристаллов кварца одного из месторождений, разрез которых, параллельный оси L_3, изображен на рис.3. Кристаллы сложены кварцем двух генераций. Дефектны обе генерации кварца, причем для первой из них характерно блоковое, мозаичное строение, для второй – трещиноватость и двойникование. Возникновение мозаичного строения произошло в начальный период роста индивида, в дальнейшем новые блоки мозаики не образуются, однако старые не исчезают, а наследуются последующими зонами роста.

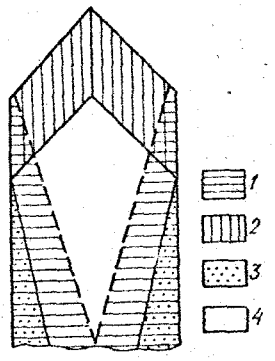


Рис.3. Схема мозаичного кристалла

1 – область развития мозаичности, первая генерация; 2 – область развития трещин и двойников в пирамидах $\langle r \rangle$, $\langle z \rangle$ второй генерации; 3 – пирамида $\langle m \rangle$ первой генерации; 4 – пирамиды $\langle r \rangle$, $\langle z \rangle$ в бездефектной области первой генерации

Из рис.3 видно, что в первой генерации пирамиды роста граней гексагональной призмы полностью дефектны, пирамиды же роста граней основных ромбоэдров дефектны частично (53%), причем степень их дефектности по мере роста индивида уменьшается. На основании формул (I)–(6) вычисляем, что область мозаичного строения в кварце первой генерации занимает 70% ее объема, причем 36% объема приходится на долю $\langle m \rangle$, 34% на $\langle r \rangle$ и $\langle z \rangle$. Таким образом, из формулы анатомии индивидов подсчитываем, что

$$\{[\langle r\rangle_{32} + \langle z\rangle_{32} + \langle m\rangle_{36}]\}_{70} \rightarrow \{[\langle r\rangle_{50} + \langle z\rangle_{50}]\}_{30},$$

откуда объем дефектных областей первой и второй генерации соответственно равен 70 и 100%, $V_{ДЕФ} = 79\%$, $V_{БЕЗДЕФ} = 21\%$.

Таким образом, при необходимости, формулы записи анатомии индивидов (I)–(6) могут быть дополнены данными о степени дефектности кристаллов, окраске отдельных пирамид роста, содержании полезных компонентов и т.д.

Для более полного представления об эволюции морфологии и анатомии кристаллов в ряде случаев полезно написание двух формул, одна из которых отражала бы изменение внутреннего строения кристалла, другая – изменение морфологии в разные периоды и стадии роста. Это вызвано тем, что не все грани кристаллов имеют собственные пирамиды роста и изменение секториального строения не всегда соответствует и отражает изменения в морфологии кристаллов. Так, для пирита (рис.4) эволюцию секториального строения и изменения в морфологии можно записать так:

$$\frac{[\langle 100\rangle_a]_b \rightarrow [\langle 111\rangle_c + \langle 100\rangle_d]_f \rightarrow [\langle 100\rangle_k + \langle 111\rangle_l]_n}{[\{100\}] \xrightarrow{\rightarrow S} [\{111\} + \{100\}] \xrightarrow{\rightarrow 0} [\{111\}] \rightarrow [\{111\} + \{100\}] \xrightarrow{\rightarrow S_1} \xrightarrow{\rightarrow S_2}},$$

где S_1, S_2 – площадь соответствующих граней; $S_1 + S_2 + \cdots + S_i$ – площадь поверхности кристалла; $\rightarrow S$ и $\rightarrow 0$ – площадь грани соответственно увеличивается и уменьшается.

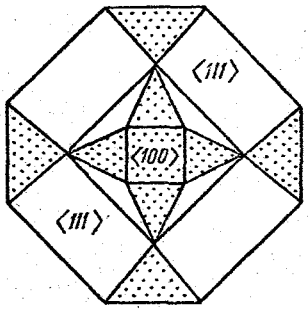


Рис.4. Схема секториального строения пирита в сечении $\perp L_2$ (по Т.А.Великобореи)

Таким образом, приложенная форма записи секториального строения индивидов может быть полезной: 1) при расшифровке эволюционного развития процессов минералообразования, наглядно показывая смену условий роста кристаллов; на этой основе облегчается сопоставление времени формирования разных кристаллов соответствующего минерального вида; 2) для оценки качества монокристального сырья.

Определение относительного объема тех или иных пирамид или периодов роста имеет практическое значение при оценке качества пьезооптического и ювелирного сырья по содержанию кондиционного материала. На месторождениях рудных полезных ископаемых повышенное содержание какого-либо полезного компонента также нередко связано с определенными пирамидами или зонами роста того или иного минерала.

При некотором усложнении записи в виде формул можно выразить не только секториальное строение кристалла, но также зональное строение каждой пирамиды нарастания. В этом случае количественная оценка объема зон и пирамид роста может быть дополнена обозначением их состава или свойств (например, окраски).

Литература

1. Григорьев Д.П. О законах анатомии кристаллов. „Кристаллография", 1971, т. 16, вып. 6.

2. Карякина Т.А. Анатомия и дефекты кварца. Зап. ВМО, 1975, ч. 101, вып. 2.

3. Леммлейн Г.Г. Секториальное строение кристаллов. М.-Л., Изд-во АН СССР, 1948.

4. Шефталь Н.Н. Ритмичность в процессе роста кристаллов. Вестник МГУ. Геология, 1966, № 6.

5. Эшкин В.Ю., Карякина Т.А., Богданова Г.Н. Типы кристаллов кварца и закономерности их пространственного размещения на одном из хрусталеносных полей Урала. Геология, поиски и разведка нерудных полезных ископаемых (Межвузовский сборник). Изд. ЛГИ, 1974, вып. 1.