

К. И. ЧЕПИЖНЫЙ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ДИСЛОКАЦИОННЫХ МЕХАНИЗМАХ РОСТА КРИСТАЛЛОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГЕНЕТИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ

Одной из важных проблем генетической минералогии является изучение реального строения кристаллов. Постановка этой проблемы относится к концу 50-х началу 60-х годов, когда в минералогии и кристаллографии, благодаря успехам физики твердого тела, произошло резкое смещение интересов в сторону изучения реального строения кристаллов.

Уже первые исследования граней кристаллов на электронных микроскопах и другими современными методами показали, что они имеют исключительно сложное строение и, следовательно, их рост и растворение отличаются от идеальных схем, разработанных в теориях Фольмера, Косселя, Странского, Френкеля.

Одним из первых исследователей, разработавших теорию роста дефектных кристаллов, был Франк (Frank). При разработке своей теории Франк исходил из предположения, что на рост кристаллов большое влияние могут оказывать линейные несовершенства — дислокации. В связи с тем, что дислокации описывают нарушения кристаллических решеток, привлечение теории дислокаций особенно перспективно в сфере изучения генезиса тонкого строения минералов.

В настоящее время теория дислокаций является той физической базой, на основе которой стало возможным решать ряд задач генетической минералогии: 1) производить расшифровку реальных механизмов роста, растворения и плавления минералов; 2) выяснять природу вицинальных образований на гранях кристаллов; 3) выяснять механизмы образования в минералах включений, отрицательных кристаллов и каналов; 4) объяснять механизмы роста дефектных кристаллов (сферолиты, скелетные и реберные кристаллы, спирально закрученные кристаллы и др.); 5) объяснять способы образования некоторых типов зональности в минералах; 6) выяснять причины появления некоторых типов оптической неоднородности в минералах; 7) объяснять типоморфные особенности минералов; 8) выяснять закономерности распределения примесей в минералах; 9) объяснять прочностные свойства минералов (в том числе пластические и хрупкие деформации в минералах и горных породах); 10) изучать политипизм и полиморфизм в минералах.

Из приведенного далеко не полного перечня видно, что привлечение теории дислокаций дает ключ к унифицированному физически обоснованному решению различных, с минералогической точки зрения, задач.

Рассмотрим некоторые особенности дислокаций и их значение для решения задач генетической минералогии.

Дислокации. В соответствии с законами геометрической кристаллографии, кристалл представляет собой трехмерную решетку, однородную на всем своем протяжении. Такое представление о строении кристалла является идеальным. Изучение реальных кристаллов показывает, что идеальное расположение структурных единиц в них всегда в большей или меньшей степени нарушено, а это так или иначе отражается на свойствах вещества кристалла.

Наиболее общим типом несовершенств в кристаллических решетках, широко привлекаемых для объяснения свойств кристаллов, являются дислокации. Введение понятия о дислокациях позволило успешно объяснить не только механизм простого скольжения, но и явления двойникования в кристаллах. Дислокации с успехом были привлечены также для объяснения пластических свойств и механизма роста природных и искусственных кристаллов.

Механизм пластического скольжения в кристаллах впервые был объяснен введением в 1932 г. Тейлором (Тейлор, 1934) понятия о краевой дислокации.

Геометрия и характер распространения такого скольжения показан на рис. 1. Как видно из рисунка, в случае краевой дислокации, сдвиг в кристалле происходит не по всей плоскости, а только с одной стороны и таким образом, что на другой стороне кристалл остается ненарушенным. При движении дислокации через кристалл она выйдет, при этом кристалл станет идеальным, но со ступеньками с двух сторон.

Из приведенного примера становится очевидной связь морфологии и пластической деформации в кристаллах с дислокациями.

В 1939 г. Бюргер (Бюргер, 1939) расширил понятие о дислокациях, введя представление о винтовом скольжении. В простейшем случае винтовая дислокация может быть получена путем сдвига монокристалла, как это показано на рис. 1.2.

Изучение явлений дислокационного скольжения в кристаллах показало, что они могут быть сведены к трем основным типам, показанным на рисунках 1, а—в.

Указанные типы скольжения в природе скорее всего приводят к образованию скрученных (рис. 1), изогнутых и расщепленных кристаллов.

Скульптуры, образуемые дислокационными спиралями на гранях кристаллов. В условиях роста и растворения кристаллов особое значение приобретают ступеньки, образуемые винтовыми дислокациями.

При выходе винтовых дислокаций, на поверхности кристалла образуется ступенька (рис. 1), которая при росте превращается в спираль. Высоты ступенек спиралей равны или кратны параметру решетки кристалла. Изучение спиралей (рис. 2) показало, что среди них выделяются следующие типы: круговые, полигональные, переплетающиеся спирали, спирали, формирующиеся при дорастании ступеньки образованной наклонной границей, являющейся частично границей кручения, спирали, образованные двумя дислокациями одного и разных знаков. При росте или растворении кристаллов спирали взаимодействуют, что приводит к образованию сложных скульптур (вициналей). Для расшифровки таких скульптур важное значение имеют приведенные на рисунках 2, 3 способы объединения (суммирования), ступенек, приводящие к образованию вициналей разного порядка. На рис. 2 приведен пример образования ямок травления и бугорков роста с помощью двойных спиралей. Двойные спирали в свою очередь могут взаимодействовать с образованием более крупных форм роста или растворения. Принцип такого взаимодействия показан на рис. 3. Как видно из этого рисунка, характер образующихся скульптур зависит от расположения двойных спиралей (АВ и ВГ) относительно друг друга. Взаимодействие трех двойных спиралей, расположенных на поверхности базиса кристалла по определенным струк-

резко увеличилась. Дальнейшее увеличение площади растворения происходит при движении кольцевой ступеньки *жкм* к периферии вплоть до выхода ее из кристалла. При выходе ступеньки из кристалла его высота уменьшается на высоту ступеньки двойных спиралей. По направлению к центру кристалла расширение области, охваченной растворением, будет осуществляться путем «прогибания» ступенек *ав*, *бе*, *гд*.

Положение a_3 . Показана картина, фиксирующая момент сброса внутренней замкнутой ступеньки растворения. Надо особо отметить, что на этой стадии так же как и на стадии a_2 , в кристалле существует зона растворения (z_2), а также реликтовая центральная и краевая зоны (z_1).

Положение a_4 . Треугольник в центре представляет сформировавшуюся ступеньку вскоре после ее отрыва. Следует обратить внимание на то, что дитригональное сечение ступеньки на периферии кристалла к центру кристалла может переходить в тригональное.

Положение a_5 . Изображен момент, когда в центральной части кристалла ступенька превратилась в «точку» (в центре произошло полное растворение). Ступеньки *аб*, *вг*, *де* заняли исходное положение. В случае, если кристалл имеет блочное строение и дислокации выйдут из верхнего блока, то ниже вскрыется идеальная поверхность нижнего блока, условно показанная в положении a_6 .

Положение a_7 . В случае, если дислокации не оканчиваются, то ступеньки *аб*, *вг*, *де* продолжат свою работу. Они начнут снова прогибаться, последовательно принимая положения, подобные a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 (цикл повторится). Положение a_7 представляет повторение случая a_4 . Такая операция привела к образованию в кристалле новой ступеньки (z_3). Подчеркнем, что в центре кристалла наблюдается реликтовая зона (бугорок растворения).

Положение a_8 . Изображен момент полного растворения ступеньки в центре кристалла.

Положение a_9 . Изображен момент полного растворения центральной ступеньки после третьего цикла (момент a_7 для краткости опущен). В кристалле появилась новая зона (z_4). При последующих «сбросах» ступенек в кристалле будет образовываться все более и более глубокая ямка. Предположим, что случай a_{10} соответствует моменту, когда дислокации выходят из верхнего блока. В этом случае по мере расширения ступенек будет вскрываться чистая поверхность нового блока кристалла (z_5).

Положение a_{11} . Момент сброса внутренней ступеньки. Область, заштрихованная сеткой, соответствует поверхности идеального кристалла, спирали *аб*, *вг*, *де* исчезли. Точками условно показано положение бывших дислокаций.

Положение a_{12} . Показано полное строение ямки травления после завершения разобранных циклов. Рис. 5 служит примером ямок, которые образуются по изложенной схеме.

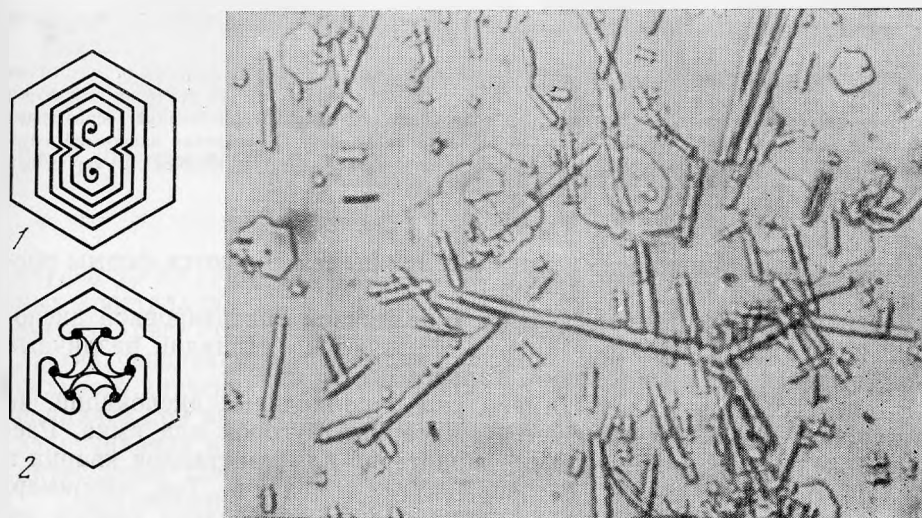
Рассмотренный механизм образования ямок имеет важное значение как для понимания способа образования плоскодонных ямок, так и для понимания связи между ямками разного порядка. Совершенно очевидно, что в случае, если ямки травления будут иметь глубину всего лишь в один параметр решетки (равный ступеньке винтовой спирали), то увидеть такую ступеньку будет чрезвычайно трудно. Но если произойдет повторение ряда циклов, то при сложении ступенек возникает крупная ямка, которая вполне поддается и микроскопическому изучению. Подчеркнем, что глубина такой ямки обязательно должна быть кратной параметру решетки, так как она образована целым числом замкнутых ступенек. Таким образом, измеряя высоту макроямок (ряда ступенек), можно получить представление и о высоте элементарных ступенек, образуемых элементарными спиралями роста. В связи с этим определение высоты макроямок можно рассматривать как один из способов опреде-

Рис. 5. Стрoение ямок травления на (0001) кварца, выявленное на электронном микроскопе



Рис. 6. Пример расшифровки механизма роста кристаллов крестобалита в силикатном расплаве

- 1 — рост с помощью двойной спирали;
 2 — рост с помощью трех двойных спиралей.
 Сфотографировано на МУФ-6



ления высоты элементарных ступенек. Само собой разумеется, что все вышесказанное справедливо и для форм роста.

При микроскопическом изучении форм роста и растворения, наряду с фокальными наблюдениями, наилучший эффект можно получить при наблюдениях методом фазового контраста, методом муара и методом «цветного» травления (наблюдение цветных картин интерференции в отрицательных кристаллах в отраженном свете). Хорошие результаты можно получить также при фотографировании в ультрафиолетовом свете (МУФ-6). При этом высокое разрешение и контраст тонких скульптур обеспечиваются не только благодаря коротким длинам волн, но и благодаря селективному поглощению ультрафиолетового света примесями, декорирующими ступеньки роста. Зная закономерности развития дислокационных ступенек, можно с успехом производить расшифровку механизмов роста и растворения скульптур, наблюдающихся как на поверхности граней, так и в объеме кристаллов. Пример расшифровки механизма роста кристаллов крестобалита в силикатном расплаве приведен на рис. 6. Из фотографии и приведенной внизу расшифровки хорошо видно,

что кристалл 1 рос с помощью двойной спирали (комбинация правой и левой дислокаций), а кристалл 2 с помощью трех двойных спиралей (см. также рис. 4), обусловивших своеобразие скульптур роста.

Изучение спирально построенных ямок травления и бугорков роста на гранях кристаллов кварца показало, что их форма на разных гранях различна и резко зависит (при данных условиях) от наклона винтовой дислокации или группы дислокаций.

При росте или растворении дислокации, выходящей на поверхность перпендикулярно грани, образуется симметричный бугорок или ямка. Это обстоятельство позволяет (по наклону бугорков или ямок) определить направление оси дислокации.

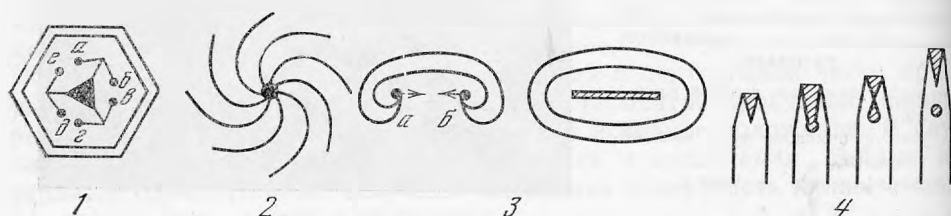


Рис. 7. Дислокационные механизмы образования отрицательных кристаллов и захвата включений

1 — образование отрицательной формы при встрече ступенек генерируемых двойными спиралями *ab*, *bc*, *cd*, *de*; 2 — незарастающий канал, образующийся в области максимального кручения структуры; 3 — образование отрицательного кристалла при сближении (притяжении) дислокаций, образующих двойную спираль; 4 — дипольный механизм обособления включений. Обособление включений обусловлено дислокационным перекручиванием незарастающей полости, образующейся в вершинной части кристалла

Примером различно асимметричных вициналей являются формы роста на гранях кварца.

Установлено, что именно в связи с различной ориентировкой дислокаций на гранях ромбоэдров кварца образуются вициналии различных типов, выделенные в свое время Кальбом.

В тех случаях, когда мы имеем ряд параллельных дислокаций, на поверхности кристалла образуется суммарный бугорок или ямка. Распределение дислокаций группами, характерно для кристаллов кварца и берилла, что обуславливает и специфику их травления. Так, например, при травлении вициналей, развитых на гранях ромбоэдров кварца, их растворение начинается с вершин, где образуется крупная суммарная ямка.

Одновременно вся вицираль покрывается мелкими ямками растворения. Изучение «цветных» форм травления на гранях большого ромбоэдра кварца при больших увеличениях показало наличие цветных спиралей растворения, свидетельствующих о спиральном механизме растворения кварца вдоль каналов, отходящих от вершин вициналей. Ямки травления на гранях трапецоэдра и призмы кварца асимметричны, что связано с наклонным положением дислокаций. На грани пинакоида при травлении HF образуются треугольные ямки травления. Изучавшиеся природные ямки травления имели дитригональную форму (рис. 5). Крупные ямки травления образуются вследствие слияния более мелких ямок. Это обстоятельство часто приводит к образованию макроформ, именуемых в минералогии футлярами. Избирательное травление и последующая регенерация могут приводить к появлению в минералах агрегативности и зональности.

Дислокационные механизмы образования отрицательных кристаллов и каналов, и включений. Экспериментально установлено, что дислокационный механизм роста кристаллов предопределяет не только специфику

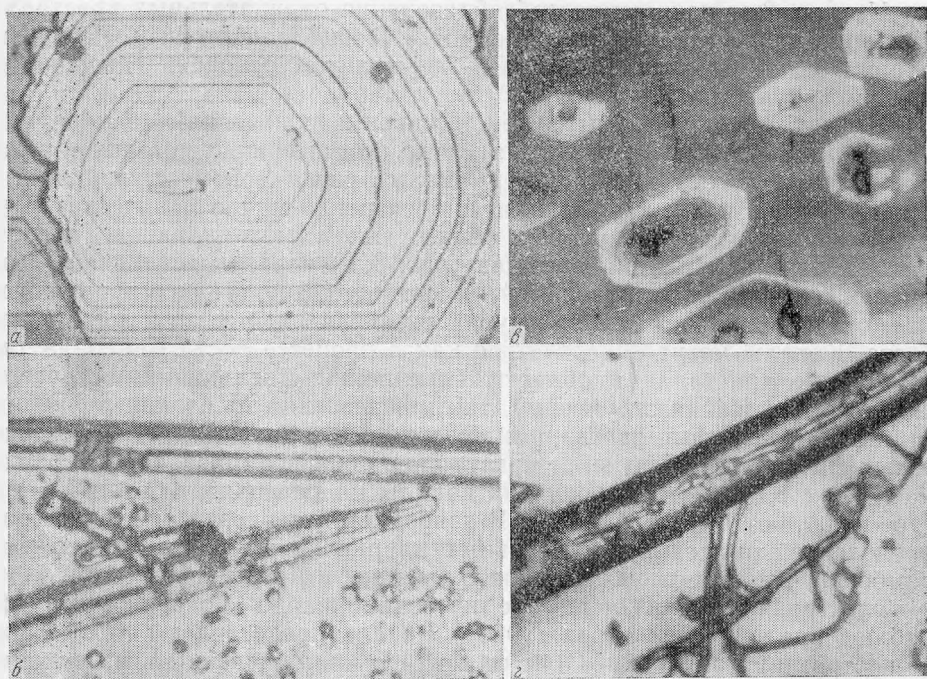


Рис. 8. Примеры, иллюстрирующие дислокационные механизмы образования отрицательных кристаллов и включений

скульптур на гранях кристаллов, но и способы образования отрицательных кристаллов, каналов и включений. Отрицательные кристаллы образуются (рис. 7): в областях смыкания дислокационных ступенек; в областях скоплений и пересечений дислокаций, где кристалл вследствие сильного кручения структуры не растет; с помощью механизма двойных спиралей при их аннигиляции; путем дипольного механизма (вследствие закручивания незарастающей трубки, формирующейся в осевых частях нитевидных кристаллов).

Образование отрицательных кристаллов с помощью указанных механизмов было установлено в природном кварце и берилле, а также в синтезированных кордиерите, муллите, волластоните, кристобалите, в кристаллах $V_2O_5 \cdot 3H_2O$, MoO_3 и ряде других соединений. Проведенные наблюдения позволяют считать, что дислокационные механизмы образования включений имеют общеминералогическое значение. Рассматривая дислокационные механизмы образования антикристаллов, мы не исключаем других возможных способов их образования.

На рис. 8 приведены конкретные примеры, иллюстрирующие образование отрицательных кристаллов и включений с помощью дислокационных механизмов. Из приведенных способов образования включений особенно важным является дипольный механизм, обеспечивающий быстрое размножение включений.

На рис. 8, *a* показан отрицательный кристалл — 1, образовавшийся при сближении и аннигиляции правой и левой дислокаций, образующих двойную спираль в кристалле MoO_3 .

На рис. 8, *b* показано образование включений в осевой части нитевидного кристалла $V_2O_5 \cdot 3H_2O$ с помощью дипольного механизма. Вблизи вершины кристалла отчетливо видна незарастающая трубка — 1, вследствие закручивания которой отчленено включение — 2; 3 — цепочка включений в осевой части кристалла, образующая осевой жгут.

На рис. 8, в показан способ образования отрицательных кристаллов в кварце при травлении (по каналам — 1) вициналей снизу. Наличие в отрицательных кристаллах ямок — 2 фиксирует основание дислокаций, идущих на наблюдателя.

Наряду с отрицательными кристаллами и включениями в минералах (кварц, топаз, берилл, слюды, аксинит, касситерит, турмалин, алмаз) часто присутствуют капилляры (каналы) различной протяженности и ориентации. Микроскопическими и электронно-микроскопическими исследованиями установлено, что образование таких каналов, подобно каналам в нитевидных кристаллах (рис. 8, г) неразрывно связано с наличием в кристаллах дислокаций. В частности, аналогичное происхождение, очевидно, имеют осевые трубки в закрученных нитях хризотил-асбеста. Каналы могут образоваться как в процессе роста минерала (незаращение кристалла в областях скопления дислокаций вследствие сильного искажения структуры), так и вследствие травления природными и искусственными растворами (сверлящее травление вдоль осей винтовых дислокаций). Изучение кристаллов кварца, алмаза, топаза, берилла показало, что во всех случаях каналы на поверхности граней берут свое начало от ямок травления. В кварце характерно закономерное распределение каналов в трех главных направлениях: пинакоид, призма, ромбоэдр, вдоль которых они часто связаны в пространственную сетку.

Электронно-микроскопическое изучение кварца показало, что при наблюдении со стороны грани (0001) каналы представляют собой сложно-построенные полости. Они содержат многочисленные нитевидные субиндивиды (волокна) кварца диаметром 0,3—1 мк. Диаметры природных каналов не превышают 1—5 мк.

В связи с тем, что каналы являются концентраторами напряжений, геометрия их расположения оказывает решающее действие на морфологию ручьев скола. С другой стороны, совершенно очевидно, что каналы в кристаллах являются теми артериями, по которым могут циркулировать растворы, загрязняющие или очищающие кристалл от примесей. Понимание этого обстоятельства имеет важное значение при интерпретации причин, обуславливающих появление в кристаллах ряда примесей, различных типов оптических неоднородностей и зональности. Разительным примером очистки кристаллов по каналам (с последующей регенерацией) является образование поперечно-зональных кристаллов берилла.

Дислокации и примеси. При спиральном механизме роста кристаллов в осевых частях (ядрах) спиралей (вдоль осей винтовых дислокаций) локализуются диффузионные примеси, где они образуют «облака». Сильная дефектность кристаллической решетки в осевых частях спиралей открывает широкие возможности и для захвата (в процессе роста) этими областями структурных примесей, а в случае образования каналов и фаз.

Изучение распределения примесей в пределах спирально построенных вициналей кварца, проведенное на микроанализаторе УХА-5А, показало, что в ядрах спиралей локализуются Al, Mg, K, Fe. Из этих наблюдений можно сделать вывод о том, что наличие дислокаций обуславливает и дискретный характер распределения в минералах и некоторых примесей.

Используя особенности травления дислокаций, нам удалось соответствующей кислотной обработкой добиться значительной очистки кварца.

Термохимической обработкой хризотил-асбеста удалось изъять из волокон хризотил-асбеста бруситовые соли и получить волокна, состоящие практически из чистой двуокиси кремния. Такое силикатное волокно (символ) рентгеноаморфно. Показатель преломления — 1,464, удельная плотность волокна — 1,3 г/см³, удельная поверхность — 270 м²/г, жаропрочность — 1200°С, кислотостойкость — 0,64 г (по ГОСТ 10134—62).

Как показано в работе Чепижного (1967), для слюд также характерны дислокационные механизмы роста-растворения. Учитывая это

обстоятельство, автором производилось изучение особенностей растворения слюды на поверхности 001. Установлено, что биотит и флогопит с поверхности базиса растворяются в HCl дискретно. Любопытно, что вокруг ямок травления образуются бесцветные зоны выщелачивания, сложенные чистой SiO₂. Аналогичное выщелачивание калия, магния, железа интенсивно происходит и вдоль слоев. Используя это обстоятельство, обработкой в соответствующих кислотах биотита (Вишневые горы), флогипита и других слоистых силикатов получена серия легких высококремнеземистых тонкопластичных материалов (сипластов), обладающих рядом специфических свойств. Таким образом, можно ожидать, что дальнейшее изучение дислокационных механизмов растворения минералов при гидротермальной кислотнo-щелочной обработке минералов позволит не только лучше понять процессы минералообразования в природе, но и синтезировать ряд новых соединений.

Дислокационный рост игольчатых и реберных кристаллов. Исследованиями установлено, что при дислокационном механизме роста в расплавах часто формируются скелетные игольчатые (муллит, кордиерит) и реберные формы кристаллов (кристобалит, перовскит). При разрастании отдельных спирально построенных нитей в перовските они сливаются, образуя искаженные (скрученные) каркасы или «монокристаллы» (при объединении нитей). Кручение каркасных форм обуславливается усилиями, порождаемыми винтовыми дислокациями. Таким образом, морфология игольчатых каркасных и реберных форм кристаллов также часто предопределяется дислокационным механизмом их роста. Анализируя закономерности распределения спирально закрученных нитей в реберниках, можно получить информацию и о закономерности распределения в данном минерале пучков винтовых дислокаций.

Влияние дислокационного роста на морфологию кристаллов. Привлечение представлений о дислокационном росте очень перспективно при объяснении ряда типоморфных особенностей минералов. Появление в кристаллах определенных типоморфных признаков часто связано с особенностями их дефектного роста. В частности, высокая плотность дислокаций часто приводит к убыстренному росту отдельных граней, что резко сказывается на габитусе кристаллов. Дислокации предопределяют также особенности морфологии расщепленных и скрученных кристаллов. Поскольку дислокации являются концентраторами напряжений, высокая их плотность часто обуславливает появление в кристаллах многочисленных (не связанных с тектоническим воздействием) трещин и двойников, вызывающих появление оптических неоднородностей. Изучение сдвойникованных кристаллов кварца показало, что максимальные плотности ямок травления на (0001) приурочены к подчиненным двойникам. Плотность и закономерность распределения дислокационных ямок предопределяет также характер скульптур роста и растворения на поверхности граней кристаллов.

В качестве примера на рис. 9 приведены формы растворения на поверхности грани 0001 кварца, образовавшиеся в результате его растворения силикатным расплавом при температуре 1300°С. Изучение закономерностей расположения форм дает информацию не только о закономерностях распределения в кварце каналов, но и о механизме разбора кварцевых зерен при растворении силикатными расплавами.

Особый минералогический интерес представляет выяснение роли дислокаций при образовании сферолитов. Наиболее важной в строении некоторых сферолитов является организация их на основе «закрученных волокон» — нитей. Предполагая ведущей роль нитевидных кристаллов при образовании сферолитов, мы синтезировали серию таких кристаллов (муллит, кордиерит, кристобалит) и изучали особенности роста как самих нитей, так и образующихся из них сферолитов. Особенностью нитевидных кристаллов является то, что они содержат большое количество



Рис. 9. Электронная фотография, иллюстрирующая характер растворения силикатным расплавом зерна кварца со стороны грани 0001

1 — расплав; 2 — основное зерно кварца; 3 — отщепленные зерна кварца; 4 — характер растворения отщепленных зерен кварца; 5 — стеклорасплав; 6 — центральный канал; 7 — ряды ямок растворения

отрицательных форм, локализованных вдоль центрального жгута закручивания. В первом приближении расщепление кристалла можно себе представить как захлопывание мельчайших отрицательных форм, тем более что энергетически такое захлопывание выгодно. На рис. 10 схематично показаны основные стадии развития нитевидного кристалла, ведущие к образованию сферолита типа двулистика.

Процесс расщепления сноповидных кристаллов резко усиливается расщепляющим действием включений инородных примесей и расплава, порождающих дислокации. Приведенный механизм не распространяется на многие другие типы сферолитов (например, кристаллизация ликвационных капель и др.).

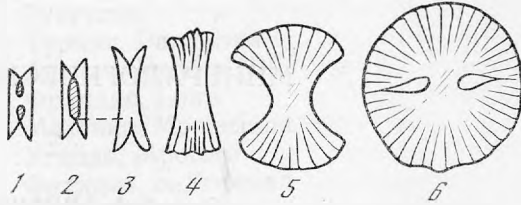
Приведенный фактический материал показывает, что на морфологию кристаллов наряду с симметрией и физико-химическими условиями среды и другими факторами важное влияние может оказывать и дефектный рост кристаллов.

С указанных позиций особое значение приобретают вопросы, связанные с изучением дислокационных бугорков на различных гранях кристаллов. Например, расшифровка и анализ топографии граней на кристаллах кварца показали, что наиболее быстрорастущая грань (0001) в кварце содержит и максимальное количество дислокационных центров, имеющих фуллерное строение. С этой точки зрения грань (0001) кварца может рассматриваться как наиболее бугристая, соответствующая К(V) граням Странского — Хартмана.

Далее по плотности дислокаций следуют грани r , R , m . Таким образом, на примере кварца мы убедились, что морфология кристаллов определяется не только особенностями их идеальной структуры, но и имеющимися в этой структуре нарушениями. В этой связи нам хотелось бы подчеркнуть еще и то, что в зависимости от плотности винтовых дислокаций может изменяться скорость роста одной и той же грани.

Рис. 10. Образование сферолита вследствие дислокационного расщепления

- 1, 2 — образование полостей;
 3 — расщепление кристалла вследствие захлопывания полости;
 4—6 — последующие стадии расщепления, ведущие к образованию сферолита



Изложенные подходы, как нам кажется, во многом позволяют по-новому взглянуть на процессы образования минералов в природных условиях. Вместе с тем, эти подходы не противоречат накопленному фактическому материалу, а лишь дополняют его, раскрывая генезис строения минералов, механизмы и способы их образования.

ЛИТЕРАТУРА

- Бартон В., Кабрера Н., Франк Ф. Рост кристаллов и равновесная структура их поверхностей.— В сб. «Элементарные процессы роста кристаллов». ИЛ, 1959.
- Taylor C. Plastic deformation of Crystals.— *Proc. Roy. Soc., Ser. A*, 1934, **145**, London.
- Бюргер Д. Винтовое скольжение в кристаллах.— В сб. «Реология». ИЛ, 1962.
- Барсанов Г. П., Чепижный К. И. О генетических типах вициналей на гранях кристаллов кварца.— *Тр. Мин. музея им. Ферсмана*, вып. 22, 1973.
- Чепижный К. И. О дефектах в поперечно-зональных кристаллах берилла. *ДАН СССР*, 1967, **172**, № 4.
- Шафрановский И. И. Лекции по кристалломорфологии. Изд-во «Высшая школа», 1968.
- Гордон Смит. Физическая геохимия. Изд-во «Недра», 1968.
- Перлин В. Д. Структура, свойства и применения хризотил-асбеста в асбестоцементной промышленности.— Сб. «Неметаллические полезные ископаемые». М. 1973.
- Франк-Каменецкий В. А. Изоморфизм и дефекты в кристаллах.— В сб. «Второй симпозиум по проблеме изоморфизма». М. 1968.
- Чурбаков В. Ф., Чепижный К. И., Лазарева В. Б., Диков Ю. П. Извлечение примесей из кристаллов кварца методом избирательного травления.— *Неорганические материалы*, т. X, № 5, 1974. *Amerlinckx*.— *Nature*, 169, London, 1952.