

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации *Томаса Виктора Габриэлевича "Свободный рост несингулярных поверхностей кристаллов из растворов"*, представленной на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 25.00.05 – минералогия, кристаллография

Диссертация В.Г. Томаса посвящена проблеме роста кристаллов быстрорастущими несингулярными гранями. Большинство существующих теоретических и экспериментальных работ анализируют рост кристаллов либо сингулярными гранями (медленнорастущие грани, соответствующие минимумам поверхностной энергии), либо округлыми поверхностями (нормальный механизм роста, форма кристалла определяется массопереносом к поверхности кристалла). Вместе с тем значительное количество кристаллов как образующихся в природе, так и выращиваемых искусственно, ограничены несингулярными гранями, которые формируются и развиваются по своим собственным правилам. Знание этих правил дает возможность извлекать генетическую информацию о процессах минералообразования в природе и оптимизировать условия кристаллизации при промышленном выращивании кристаллов. Вместе с тем, систематические исследования роста кристаллов несингулярными гранями до сих пор отсутствуют, что и определяет актуальность данной работы.

Работа базируется на огромном фактическом материале, прежде всего, на многочисленных гидротермальных экспериментах по росту кристаллов берилла и корунда, а также экспериментах по выращиванию кристаллов квасцов из низкотемпературных водных растворов и результатах численного моделирования.

Безусловным фундаментальным достоинством работы является разработка единого количественного подхода к процессам роста несингулярных поверхностей. Этот подход позволяет не только описывать наблюдаемые сценарии, но и предсказывать развитие поверхности кристалла исходя из небольшого количества кинетических характеристик. Результаты диссертации имеют общий характер и должны быть применимы к описанию кристаллизации любых классов соединений из растворов, расплавов и газовой фазы.

Прежде чем остановиться на некоторых конкретных моментах, хочется отметить, что диссертация оставляет очень хорошее впечатление. Это целостное оригинальное исследование, выполненное на высоком научном уровне и имеющее большую ценность как

для фундаментального кристаллогенезиса, так и для выращивания промышленно важных кристаллов и решения проблем генетической минералогии.

Глава 1 дает подробное описание и критический анализ имеющихся подходов к описанию роста кристалла несингулярными гранями и представляет самостоятельную ценность, далеко выходящую за рамки «обзора литературы». В качестве замечания можно отметить, что проблема вытеснения из огранки кристалла медленно растущих гладких граней за счет несингулярных поверхностей рассмотрена недостаточно полно и ясно. Во-первых, при регенерации идеального монокристаллического шара медленно растущие грани не могут исчезать из огранки кристалла. Процессы, ведущие к исчезновению относительно медленно растущих граней, требуют наличия входящих углов между субиндивидами, ключевая роль которых требует большего внимания. Во-вторых, необходимо определить применимость формулы 1.5 диссертации к микрограням на регенерационных поверхностях. Можно ли использовать эту формулу для поверхностей с размерами микрограней в десятки и сотни микронов? Вполне возможно, что для таких масштабов уже надо рассматривать эволюцию каждого сегмента по отдельности. В-третьих, снижение скорости роста несингулярных поверхностей по их мере эволюции с большой вероятностью связано с уменьшением числа точек роста (мест, где возможно присоединение строительных единиц к поверхности кристалла) за счет уменьшения активности дислокационных источников ростовых слоев (стандартная ситуация при росте макроскопической грани при резком увеличении пересыщения). Этот ключевой аспект проблемы требует отдельного рассмотрения.

Глава 3. Очень важным представляется результат о том, что «наиболее быстрорастущие простые формы, активно участвующие в огранке субиндивидов и редко представленные в виде макрограней, могут расти плоским фронтом при точной ориентировке плоских затравок параллельно этим граням». Вместе с тем, хотя формирование плоского фронта роста было зафиксировано для кристаллов берилла, для кристаллов квасцов его получить не удалось. Было бы интересно понять причины этих различий.

Интересным и нетривиальным результатом работы является подтверждение присутствия на диаграммах скоростей роста острых максимумов, положение которых отвечает наиболее быстрорастущим и фиксируется на искривленной несингулярной поверхности в виде своеобразных «ребер».

Геометрический отбор на несингулярных поверхностях приводит к уменьшению количества индивидов на единицу длины профиля пропорционально (время)<sup>-0.734</sup>. Вместе с тем теоретический анализ (N.H. Gray *Mathematical Geology*, 1984, Vol. 16, No. 1, P. 91-100) предсказывает более плавное уменьшение числа субиндивидов пропорциональное (расстояние от подложки)<sup>-0.5</sup>. В чем могут быть причины такого различия?

Глава 4 анализирует распределение различных типов примесей и примесных фаз в кристаллах, сформированных за счет роста несингулярной поверхностью. Виртуозное использование просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения и инфракрасной спектроскопии позволило визуализировать структуру соответствующих секторов роста и попутно ответить на ряд важных вопросов, например, о возможных путях вхождения воды в структуру номинально безводных минералов или об использовании концентрации воды в берилле для целей термобарометрии.

Требуется пояснения вопрос, почему присутствие ионов хрома приводит к уменьшению количества ламелл бёмито-подобной фазы на границах секторов роста? Не понятен термин «плоские краевые дислокации», используемый при формулировке второго защищаемого положения.

Глава 5 формулирует математическую модель роста кристалла несингулярной поверхностью. Результаты численного моделирования по этой модели показывают хорошее соответствие с экспериментальными данными, что является сильным результатом и дает модели предсказательную силу.

Очень интересен анализ устойчивости несингулярного фронта роста, который позволяет делать вывод об устойчивости шероховатого фронта роста по масштабу исходной шероховатости несингулярной поверхности. Вместе с тем, на практике вопрос требует более детального анализа дефектной структуры растущей грани, так как входящие углы между субиндивидами приводят к формированию дополнительных дислокаций, которые могут приводить к увеличению общей скорости роста и качественному изменению морфологии кристалла. Подобные качественные изменения наблюдались автором отзыва для грани куба на кристаллах квасцов (A.G. Shtukenberg et al., *Phys. Chem. Minerals* 2001, Vol. 28, P. 665-674). В целом роли дислокаций, как важнейшего фактора, определяющего скорость роста грани и морфологию кристалла, в работе уделяется недостаточное внимание.

Хочется отдельно упомянуть оригинальный и реалистичный механизм образования антискелетных кристаллов, сформулированный в рамках данного исследования.

Наконец, интригующим выглядят данные о взаимной переориентировке макроскопических кристаллов берилла при их сращивании. По воспоминаниям автора отзыва, небольшие переориентировки макроскопических кристаллов наблюдались А.В. Шубниковым для кристаллов кварцов (к сожалению, ссылки нет). В данный момент среди специалистов по росту кристаллов имеет место настоящий бум «несклассической кристаллизации», где одну из важнейших ролей играет присоединение больших (нанометры и десятки нанометров) строительных блоков к основному кристаллу в точной кристаллографической ориентации. С точки зрения автора отзыва, однако, большинство (но не все) таких сообщений не имеют отношения к действительности и являются результатом некачественного анализа данных. Если явление переориентации сращиваемых кристаллов действительно имеет место для макрокристаллов берилла, то оно имеет фундаментальную важность и требует пристального внимания.

Следует отметить, что высказанные выше замечания и вопросы ничуть не умаляют ценность данного исследования и скорее должны расцениваться как пожелания к дальнейшей работе. Диссертация по актуальности, научной новизне, методическому уровню и практической значимости соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Томас Виктор Габриэлевич заслуживает присвоения ему ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 25.00.05 – минералогия, кристаллография.

Профессор-исследователь  
университета г. Нью-Йорк  
доктор геол.-мин. наук



(А.Г. Штукенберг)