

О т з ы в

официального оппонента о диссертационной работе Виктора Габриэлевича Томаса «Свободный рост несингулярных поверхностей кристаллов из растворов», представленной на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 25.00.05 – минералогия, кристаллография.

Диссертационная работа В.Г. Томаса посвящена одной из центральных проблем теории роста и практики выращивания кристаллов – регенерации кристаллов. Диссертант вполне обосновано сводит её к изучению морфологических (кинематических) и кинетических особенностей роста несингулярных (чаще всего регенерационных) поверхностей и обусловленных ими своеобразных анатомических следствий. То, что рост несингулярных поверхностей существенно отличается от роста сингулярных (плоских) граней стало очевидно более сотни лет назад. Тем не менее должной теории такого роста до сих пор не создано. Особую актуальность и практическую важность проблеме регенерации придает то обстоятельство, что искусственное выращивание кристаллов в большинстве случаев производится на несингулярно ориентированных затравках. Как показывает опыт качество выращиваемых кристаллов зависит от умения управлять и контролировать процесс на стадии регенерации. Поскольку мы часто сталкиваемся с примерами регенерации кристаллов в природе, то неоспоримо и минералогенетическое значение этого процесса. Совершенно понятна заинтересованность минералогов в раскрытии закономерностей роста и восстановления формы кристалла после соответствующих актов растворения или механических деформаций.

На основе изучения текущего состояния проблемы регенерации кристаллов диссертантом сформулирована основная цель диссертационной работы – разработка физической модели роста несингулярных поверхностей, адекватно описывающей реальные ростовые процессы. Причем эта модель согласно ожиданиям автора должна не только интерпретировать процессы, связанные с феноменом регенерации, но и быть приложима для объяснения других явлений реального кристаллообразования.

Сразу отмечу, что эту основную задачу В.Г. Томасу удалось решить. Модель построена и она работает. На этом по большому счету основывается совокупность положений, сформулированных в диссертации, которые можно квалифицировать как научное достижение в развитии теории и практики регенерационного кристаллогенезиса. Ниже даем краткую по главам характеристику работы, обращая внимание на некоторые важные результаты проделанных экспериментов и теоретического анализа.

Диссертационная работа В.Г. Томаса состоит из введения, шести глав и заключения. Во **Введении** дана общая характеристика работы обоснована её актуальность, формулируются цели и задачи. Здесь же формулируются четыре защищаемых положения, которые последовательно доказываются в главах 3 – 5. Там же указано, что работа прошла апробацию на отечественных и международных конференциях. По материалам диссертации опубликовано (23 статьи, в том числе, 18 из них – в ведущих международных и отечественных высокорейтинговых журналах).

Глава 1 представляет собой исторический очерк развития представлений о регенерации кристаллов, кратко излагаются основные результаты, проведённых ранее исследований, автор начинает анализ текущего состояния проблемы. Автор начинает анализ с поверхностной энергии кристалла и ее локальной анизотропии, поскольку с которой связана суть терминов «сингулярная грань» и «несингулярная поверхность». На этом основании сформулированы задачи собственных исследований. В целом материал 1-й главы представляет самостоятельную ценность, далеко выходя за рамки «Обзоров литературы» диссертационных работ. В **главе 2** дается описание объектов исследования, методик ростовых экспериментов и методов исследования выращенных кристаллов.

Очень интересен предложенный В.Г. Томасом метод определения скоростей роста одновременно растущих граней различных простых форм с использованием выпукло-вогнутых затравок. Использованный в работе набор методов исследования достаточно обширен, однако нельзя не обратить внимание на отсутствие методов атомно-силовой микроскопии весьма информативных в исследовании на наноуровне морфологических особенностей строения и эволюции регенерационных поверхностей. Эти методы (в моё время их не было, а сейчас они есть) полезны для изучения начальных стадий структуры растущих поверхностей. **Глава 3** посвящена рассмотрению эволюции фронтов роста несингулярных поверхностей кристаллов берилла и корунда, растущих из гидротермальных растворов. Основное внимание здесь уделено изучению явлений, направленных на экспериментальное обоснование разрабатываемой физической модели – станового хребта диссертационной работы. К таким явлениям в частности относятся:

- уменьшение в процессе регенерации набора граней, участвующих в огранке субиндивидов на растущей несингулярной поверхности;
- постепенное снижение во времени числа субиндивидов на фронте ее роста;
- постепенное изменение во времени скорости продвижения фронта роста;
- чувствительность пути эволюции растущей поверхности к параметрам шероховатости последней к моменту начала роста.

В этой главе особый интерес представляет новый подход к рассмотрению сингулярных областей на несингулярных участках регенерирующихся монокристаллических шаров. Такой подход рассмотрения привел диссертанта к парадоксальным результатам. Наблюдательность диссертанта в этом вопросе вызывает восхищение. **Глава 4** посвящена исследованиям в том числе с использованием высокоразрешающей электронной микроскопии внутреннего строения пирамид роста несингулярных поверхностей и характерных для них неоднородностей. Автор показывает, что материал пирамиды роста несингулярной поверхности (пирамиды регенерации) можно рассматривать, как «параллельный сросток кристаллов», сложенный мелкими пирамидами роста микрограней, границы между которыми являются концентраторами напряжений, обусловленными некогерентной стыковкой ростовых слоев по этим границам. Локальные повышения внутреннего давления в области границ срастания параллельного сростка вызывают в кристаллах гидротермально выращенного берилла локальные нарушения стехиометрии, что объясняется возможностью взаимных изоморфных замещений между основными элементами – Be, Al и Si. В корунде описанные напряжения стабилизируют эпитаксиальные вроски метастабильного бёмита. При этом предложенное в работе объяснение интересного явления образования ламелей в кристаллах корунда выглядит вполне разумно. Значительная часть материала главы является совершенно новой и несомненно привлечет внимание широкого круга минералогов и геохимиков. В частности, уникальна новая информация о деталях внутреннего строения кристаллов на наноуровне о природе ОН-центров в корунде, проливающая свет на возможную природу воды в номинально безводных минералах и т.д. В **Главе 5**, базируясь на материале предыдущих глав сформулирована адекватная модель процессов роста несингулярных поверхностей кристаллов, тем самым решена основная задача диссертационной работы. Модель безусловно новая и заслуга в ее разработке полностью принадлежит соискателю. На простом примере он объясняет работу модели и показывает, что эволюция построенной модельной поверхности полностью качественно отвечает реальному росту. Основной объем главы (более 80%) посвящен проверке модели на количественное соответствие реальным процессам роста несингулярных поверхностей. Эта проверка на

2-х примерах (рост плоской затравки и эволюция сферической монокристаллической поверхности) показывает, что при близости геометрии шероховатостей на реальной и модельной поверхностях наблюдается хорошее соответствие модели реальным процессам.

Глава 6 призвана продемонстрировать применимость подходов, использованных при построении модели роста несингулярных поверхностей, к изучению различных вопросов кристаллогенеза, связанных с регенерацией кристаллов. В **Заключении** кратко изложены основные результаты работы.

В целом диссертационная работа В. Г. Томаса – это обширное исследование по чрезвычайно актуальной теме, интересной кристаллографом, кристаллотехнологам, материаловедам, минералагам. Желательна её публикация в виде отдельной монографии (будет третья в мировой литературе после Д.И.Артемяева, 1914 года, А.М.Асхабова, 1979 года). Но, перед этим автору будет полезно ещё раз обдумать и уточнить некоторые вопросы.

1. Вопрос о независимости скоростей роста субиндивидов от их размеров нельзя признать решенным окончательно. Для «булыжной мостовой» на кварце конкуренция холмиков в том числе по размерному признаку легко фиксируется. Очевидно необходимы прямые наблюдения и измерения.

2. Аналогично остаются вопросы к использованию постулатов кинематической модели, предложенной П.Н. Гаврюшкиным. Конечно, надо признать, что при сделанных допущениях модель может работать, но насколько оправданы эти допущения. Реальность сложнее и разнообразнее.

3. Предположение о равенстве скоростей роста микрограней и макрограней, принадлежащие одной и той же простой форме может быть справедливо при равенстве всех других факторов, влияющих на скорость роста. В любом случае, это не универсальный закон, а лишь приближение, которое может реализоваться в определенных условиях.

4. Что касается на первый взгляд неожиданного и крайне интересного явления поглощения плоских граней несингулярными поверхностями, которое ранее никто не наблюдал, то по данным приведенным в диссертации оно похоже имеет место. Но опять же хотелось бы иметь прямые наблюдения, осуществленные непосредственно в процессе роста.

5. Очень эффектна идея связать образующиеся субиндивиды с изначально существующими на поверхности шероховатостями (выступами и впадинами). Её невозможно оспорить, но хорошо бы её иллюстрировать столь же эффектными экспериментальными примерами.

6. Автор, анализируя шероховатость затравочных пластин, практически не уделяет внимания форме выступов и углублений на поверхности затравки, которые не могут быть постоянными. По этим выступам строятся те самые «соприкасающиеся дуги», которыми соискатель аппроксимирует выступы. Вопрос – как будет эволюционировать несингулярная поверхность, если высоты выступов разные?

7. Формулируя свою модель, роста эволюции поверхности соискатель ограничился рассмотрением только одного варианта представления исходной шероховатости поверхности – совокупностью соприкасающихся выпуклых дуг. Совершенно не исследованными остались другие варианты, – в частности, связанные с дефектностью затравки, особенностями ввода процесса в стационарный режим, протекания начальных стадий и т.д.

8. Так же вне детального обсуждения вопроса о скоростях роста микрограней и протяженных граней той же простой формы, остались роль скоростьконтролирующих факторов, кинетики процессов на самих гранях, особенностей переноса вещества, дефектов, входящих углов и т.д., которые могут оказывать сильное влияние на скорости роста прилегающих микрограней.

9. Оппонент хорошо знает и квасцы и берилл, но особенно неравнодушен к кварцу – классическому примеру кристаллов, выращиваемых на несингулярно ориентированных затравках. На кварце были установлены почти все основные закономерности регенерации

оригинальными, не имеют аналогов, основные результаты опубликованы, апробированы на различных научных мероприятиях. Упомянутые в работе материалы других авторов (главным образом в главе 1) корректно цитируются. Научная значимость и высокая достоверность результатов и выводов подтверждается фактом их публикации в высокорейтинговых журналах (в том числе первого квартиля), а практическая полезность – среди прочего и фактом получения патента РФ. Сформулированные в работе защищаемые положения в достаточной мере обоснованы. Главным результатом диссертации В. Г. Томаса является построение модели регенерационного роста несингулярных поверхностей кристаллов из растворов, а в совокупности с другими результатами его можно рассматривать как решение актуальной научной проблемы, весьма важной с теоретической и практической точек зрения.

Автореферат отражает содержание диссертации.

Тема и содержание диссертации полностью соответствуют формуле специальности 25.00.05 по пунктам: 3 (Физика минералов и современные методы исследования морфологии, внутреннего строения, структурного несовершенства, фазово-химической неоднородности и связанных с ними свойств реальных минералов, изучение их вариаций в зависимости от условий образования и изменения в природных и технологических процессах); 11 (Экспериментальная минералогия), 15 (Проблемы теоретической и практической кристаллохимии), 19 (Методы выращивания монокристаллов), 21 (Математическое моделирование кристаллических структур и свойств минералов). По актуальности и новизне полученных результатов, уровню их обсуждения и практической значимости, по количеству и качеству публикаций, содержащих основные результаты, диссертация В. Г. Томаса полностью соответствует критериям, предъявляемым к докторским диссертациям (согласно п.9 Постановления Правительства РФ № 842 (ред. от 20.03.2021) «О порядке присуждения ученых степеней»)), а ее автор Виктор Габриэлевич Томас заслуживает присуждения искомой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 25.00.05 – минералогия, кристаллография.

Асхабов Асхаб Магомедович

Почтовый адрес: 167982, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д.54.

Телефон: (8212) 24-09-70

E-mail: askhabov@geo.komisc.ru

Главный научный сотрудник лаборатории экспериментальной минералогии Института геологии имени академика Н.П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН), доктор геолого-минералогических наук, профессор,

академик РАН

 А. М. Асхабов

