

*Е. Б. Трейвус*

## НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО МОРФОЛОГИИ КРИСТАЛЛОВ КВАРЦА И МАРКАЗИТА

Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9, Российская Федерация

Представлены результаты гониометрического изучения нескольких природных кристаллов кварца. Описаны протяжённые световые рефлексы от граней различных простых форм в разных вертикальных угловых зонах. Сделаны возможные выводы об условиях роста этих кристаллов на основании гониометрических данных. Даны результаты гониометрического изучения ступеней роста на гранях главной дипирамиды кристаллов марказита из кембрийских глин Ленинградской области. Символы их торцов включают рациональные и относительно малые индексы, которые не соответствуют теоретически возможным граням на кристаллах этого минерала. Подчеркивается важность прецизионного гониометрического изучения кристаллов минералов для выяснения тонких особенностей образования кристаллов в природе, что может иметь практические приложения. Библиогр. 27 назв. Ил. 3. Табл. 2.

*Ключевые слова:* кристаллы кварца, кристаллы марказита, морфология граней.

## NEW DATA ON MORPHOLOGY OF QUARTZ AND MARKASITE CRYSTALS

*E. B. Treivus*

St. Petersburg State University, 7/9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

The results of the goniometric study of some natural quartz crystals are represented. It describes light reflections from faces of various simple forms in different vertical angle zones. It gives possible conclusions on growth conditions of these crystals on the base of goniometric data. The results of goniometric study of growth steps on faces of main bipyramid of marcasite crystals from Cambrian clays of Leningrad region are described. Symbols of their butts include rational and relatively small indexes, however, these symbols do not correspond to theoretic possible faces of crystals of this mineral.

It emphasizes the importance of precise goniometric study of mineral crystals for revealing of fine peculiarities of crystal formation in nature, which can have practical applications. Refs 27. Figs 3. Tables 2.

*Keywords:* crystals of quartz, crystals of marcasite, morphology of faces.

Как известно, поверхность граней кристаллов минералов описывалась неоднократно с большей или меньшей подробностью. Однако дальнейшее изучение её многообразных особенностей для более детальных выводов о возникновении кристаллов в природе не может не представлять интереса. Познание внешнего вида кристаллов имеет, очевидно, и прикладной смысл в целях углублённого выяснения генезиса месторождений, в конечном результате — для их поиска и разведки. При подобных исследованиях по-прежнему необходима, наряду с другими методами, гониометрия [1].

**Квари.** Мы имеем около 200 удлинённых бесцветных кристаллов гидротермального кварца размером от 1 см до 10 см по главной оси из развалов на месторождениях в Восточном Казахстане. На них присутствуют габитусные грани ромбоэдров  $R$  и  $r$ , призмы  $t$ , острых ромбоэдров  $\{30\bar{3}1\}$ ,  $\{4041\}$ ,  $\{5051\}$  и, в подчинённом развитии, на небольшой части кристаллов одного-двух трапецоэдров. Изредка наблюдаются совсем мелкие грани тригональной дипирамиды (или дипирамид)  $\{hh(2\bar{h})k\}$ .

Описанная форма, судя по литературе, типична для кристаллов такого генезиса. Грани трапецеэдров всегда наличествуют в неполном количестве, что отмечалось и раньше [2], причём подчёркивалось, что они характерны для той стороны кристалла, которая при росте была обращена вниз. Действительно, они тяготеют к основным граням противоположным тем, на которых имеются присыпки посторонних минералов. Объяснение этому, по-видимому, заключается в следующем. Как известно, зависимости скоростей роста граней разных простых форм от пересыщения характеризуются на графике веером расходящихся линий разной кривизны. Это означает, что при малых пересыщениях возникает более сложная, а при повышенных пересыщениях — более простая огранка кристалла за счёт исчезновения граней быстрого роста. Таким образом, наличие трапецеэдров на нижней стороне кристалла может служить указанием на то, что эта часть кристалла находилась при меньшем пересыщении, чем верхняя.

Среди наших кристаллов кварца есть образцы как строго призматического, так и строго пирамидального габитуса. Заметим, что имеется в виду только их внешний вид. Это не означает, что на них присутствуют грани простых форм, принадлежащих к дипирамидам в важнейших поясах с символом  $\{11\bar{2}0\}$ . В этих поясах наличие дипирамид невозможно в силу симметрии кварца. Среди пирамидальных кристаллов имеются три разновидности. Это, во-первых, кристаллы, обладающие гранями призмы  $t$  с интенсивной ступенчатостью, направленной к вершине кристалла. Во-вторых, кристаллы, на которых наблюдаются габитусные грани острых ромбоэдров с относительно *небольшими* символами, конкурирующие по размеру с гранями призмы  $t$  или даже заменяющие их. И, наконец, кристаллы, боковые поверхности которых сложены вицинальными плоскостями с *большими* индексами в их символах, преобладающими по своей величине над гранями основной призмы, к которым они принадлежат, или целиком их замещающими. В последнем случае кристалл приобретает особый вид, вплоть до его выклинивания. От сугубо призматических к сугубо пирамидальным кристаллам имеются все переходы.

В дальнейшем употребляется преимущественно термин «призма» без указания на то, что имеется в виду основная призма. Кроме того, мы вынуждены для удобства описания результатов наших измерений различить понятия пояса и зоны, хотя эти термины являются синонимами. К зоне, как и к поясу, относят грани, стереографические проекции которых находятся на одной дуге большого круга. Однако в рамках нашей работы нам под зоной удобно понимать грани, лежащие с одной стороны кристалла, т. е. в половине соответствующего пояса.

На многих кристаллах грани головки приблизительно одинаковы по размеру. Различить ромбоэдры  $R$  и  $r$  на таких индивидах невозможно. Однако установлено [3, 4], что грани основных ромбоэдров, принадлежащие одной головке и обращённые кверху, нередко меньше по величине, чем нижние. Это подтверждают и наши наблюдения. Принадлежность наиболее мелких к верхним граням доказана посторонними присыпками на них. На наших кристаллах — это глинистые минералы, редко хлорит, в одном-двух случаях наблюдался пирит, иногда — единичные осколки кварца. Причины различий в размерах граней, принадлежащих одной простой форме, обсуждались в [3, 5–7]. Эти различия являются очевидным результатом их неодинаковых скоростей роста, что может быть следствием только двух хорошо известных причин: вариациями в дефектности пирамид нарастания граней или отличием в пересыщении около них во время их образования.

Принадлежность мелкой верхней грани основного ромбоэдра к форме  $r$  подтверждается в том случае, если соседние с ней грани другого основного ромбоэдра имеют большие размеры.

Присыпки наблюдаются лишь на поверхности кристаллов. Захороненных в них присыпок (образованных ими фантомов) мы практически не видели. Поэтому их появление выглядит как одиночный акт в момент завершения роста кристаллов. Приходится предположить, что этот момент связан с такой тектонической подвижкой вмещающей породы, которая привела к прекращению роста кристаллов. Если бы эта подвижка вызвала изолирование хрусталеносной полости, то раствор в ней сохранился, рост кристалла должен был бы ещё некоторое время продолжаться, и на присыпках появился бы пусть тонкий, но новый слой кварца. Однако его отсутствие свидетельствует об уходе раствора, т. е. осушении полости. Неясно, что означает наличие присыпок лишь на небольшой части наших кристаллов.

Морфология кристаллов кварца, взятых непосредственно в жеодах на одном из восточно-казахстанских месторождений, изучалась в [8]. Также было отмечено, что частицы постороннего минерала имеются только на их поверхности. Форма головки может быть самая разнообразная, в основном несимметричная. При этом более крупными могут быть как верхние её грани, так и нижние, но относить ту или иную из них к ромбоэдрам  $R$  или  $r$  затруднительно. Нижние грани (противоположные инкрустированным присыпками) некоторых индивидов обнаруживают признаки растворения.

П. С. Вадило [9] заметил, что штриховка плоскостей призмы под гранями ромбоэдра  $r$  является более мелкой. Для наших кристаллов имеет место как такой случай, так и обратный ему. Зачастую на всех гранях призмы ступенчатость внешне практически одинакова. Иногда торцы ступеней на этих гранях блестят одновременно с гранями основных ромбоэдров, т. е. обладают теми же символами. Наряду с этим нередки индивиды, на которых торцы ступеней на гранях  $m$  отличаются наклоном от граней основных ромбоэдров. Торцы ступеней могут быть настолько широкими, что воспринимаются как самостоятельные грани или как ступени собственного наклона.

Возникновение визуально различимых ступеней разъяснено в [10–12]. При данном объёмном пересыщении на грани растущего кристалла возникают из одного источника (обычно дислокационного) через равные промежутки времени атомные ступени, перемещающиеся друг за другом с одинаковой скоростью. Они создают внешне гладкую вицинальную грань. При временном местном понижении пересыщения, вызванном спонтанной флуктуацией скорости диффузионного потока к грани в диффузионном пограничном слое, одна из этих ступеней может притормозить свой рост. Её нагонит и сольётся с ней другая атомная ступень. Ступень удвоенной атомарной высоты имеет пониженную скорость продвижения, что вызовет присоединение к ней новой моноатомной ступени, двигавшейся сзади неё. Этот процесс продолжается. В конечном итоге образуется макроступень. Описанное явление повторяется многократно, от точки к точке на грани кристалла, что и приводит к образованию штриховки.

Частота испускания ступеней их источником, т. е. крутизна исходной вицинальной поверхности, возрастает с увеличением пересыщения [11]. Поэтому обычная выпуклость поверхности кристаллов в вертикальных поясах, т. е. увеличение

плотности ступеней в направлении граней основных ромбоэдров, должна отражать изменение пересыщения раствора со временем роста кристаллов. Более крутые участки ступенчатой поверхности, находящиеся ближе к головке кристалла, образовались при более высоком пересыщении, более пологие или почти соответствующие грани призмы, вблизи основания кристалла — при относительно низком пересыщении.

Нами измерены на гониометре Гольдшмидта полярные координаты шести кристаллов. В качестве источника света, как обычно, использовался осветитель для микроскопа. Размер кристаллов по главной оси составлял от 10 мм до 25 мм. Наиболее крупный из них закреплялся на этом приборе с помощью специальной проволоочной державки. Ещё один кристалл с величиной по оси  $c$ , равной 65 мм, был измерен на прикладном гониометре. Его точность —  $1^0-1,5^0$ . Три изученных кристалла отличаются призматический габитус, остальные — призматически-пирамидальный или пирамидальный. На призматических кристаллах наблюдаются лишь формы  $m$ ,  $R$  и  $r$ . Отношение по осям  $c/a$  для призматических кристаллов находится в пределах 1,4–1,8, отношение длины других кристаллов к их размеру у основания составляет 1,9–2,0. В большинстве случаев три симметрично связанных между собой грани одного из основных ромбоэдров имеют меньшие размеры в сравнении с соседними ромбоэдрическими гранями, и потому были отнесены к ромбоэдру  $r$ . На некоторых кристаллах лишь одна из граней отличалась небольшой величиной при близости размеров других граней головки. Её также считали за грань ромбоэдра  $r$  и по ней определяли принадлежность остальных граней к ромбоэдру  $R$  или  $r$ .

Кристаллы юстировались по граням основных ромбоэдров, как преимущественно имеющим точечные и более яркие световые сигналы, чем грани призмы. Угловой размер такой световой точки, как правило, составляет  $8'-10'$ . Отсчёт полярных координат брали по субъективно оцениваемой её середине. Поэтому погрешность измерений величины  $\rho$  граней ромбоэдров не может превышать двух-трёх минут. Иногда наблюдался не один, а два близких световых рефлекса различной яркости. По-видимому, это указывает на блочное или двойниковое строение кристалла. В таких случаях отсчёт полярных координат брали по более яркой точке. Некоторые грани головки дают расплывчатый световой сигнал, и юстировка при этом менее точная. Отдельные грани головки вообще не вызывают светового рефлекса. Значение  $\rho$  для таких граней бралось по их отблеску, иногда весьма слабому, что приводило к заметному искажению координаты  $\rho$ . Однако затем всем граням основных ромбоэдров во всех зонах приписывалось их стандартное значение  $\rho$  ( $51^{\circ}47'$ ) и соответственно исправлялся параметр  $\rho$  других граней в той же вертикальной зоне.

Наряду с одиночными световыми точками, отражающими, очевидно, плоский характер поверхности, при яркой центральной точке наблюдались трёхлучевые световые сигналы от граней основных ромбоэдров. Это означает, что указанные грани покрыты трёхгранными вицинальными пирамидками с плоской вершиной. Такая скульптура граней  $R$  и  $r$  подтверждается наблюдениями под биноклем и описывалась в [7]. Причём два луча лежат в поясах, в которых находятся соседние грани этих ромбоэдров, третий луч направлен в сторону грани призмы. Грани тех же ромбоэдров некоторых кристаллов дают однолучевые световые сигналы, которые лежат в одном поясе с гранью призмы, тоже при хорошо выраженной точке основного сигнала. Он приурочен к краю светового луча с меньшим значением  $\rho$ . В этом случае

грани основных ромбоэдров обладают тончайшей ступенчатостью, наклон которой направлен в сторону граней призмы. Вариации в морфологии граней ромбоэдров, т.е. отсутствие или возникновение бугорков роста и крутизна их склонов, должны быть связаны с пересыщением раствора и наличием адсорбционно-активной примеси.

Призматические грани дают в подавляющем большинстве случаев узкие световые лучи различной протяжённости. Такой световой сигнал для призматических поверхностей кристаллов кварца отмечал И. И. Шафрановский [13]. Грани *m* характеризуются обычно яркой световой точкой на световом рефлексе вблизи его конца или непосредственно фиксирующей этот конец, который отличает максимальная величина  $\rho$ . Она может быть либо точно равной  $90^\circ$ , т.е. точно соответствовать грани призмы, либо на несколько десятков минут быть меньше или (что гораздо реже) больше  $90^\circ$ . Принадлежность главной световой точки основной призме подтверждается, как правило, ярким отблеском от грани. Параметр  $\rho$  для каждой из граней призмы определяли неоднократно, различие в результатах разных измерений не превышало 10–15 минут; затем находили его среднее значение. Следовательно, с достаточной надёжностью установлено, что во многих зонах значение  $\rho$  для граней *m* меньше  $90^\circ 00'$  на некоторую величину. Подобную особенность этих граней подметил также И. И. Шафрановский [14] как типичную для них, что отражает их вицинальный характер. Он обратил внимание и на то, что величина  $\rho$  для грани призмы бывает равной  $90^\circ 00'$ . При этом, наоборот, параметр  $\rho$  для грани основного ромбоэдра той же зоны может отличаться на несколько минут от теоретического. Иначе говоря, грань основного ромбоэдра также может замещаться вицинальной плоскостью. Таким образом, не исключено, что приписываемое нами граням основных ромбоэдров неизменное значение  $\rho$ , равное  $51^\circ 47'$ , и найденное одновременно отличие  $\rho$  от  $90^\circ 00'$  для граней призмы *m* не всегда имело место для наших кристаллов.

Мелкие круглые световые рефлексы от граней изученных простых форм, а не размазанные яркие бесформенные пятна вместо них, свидетельствуют, по нашему мнению, о хорошем качестве кристаллов, практическом отсутствии заметной дефектности пирамид нарастания граней, что могло бы повлиять на скорости их роста.

Указанные световые лучи лежат в рассматриваемых вертикальных поясах, причём такой луч выглядит на своём протяжении то более ярким, то более тусклым, вплоть до того, что на отдельных участках он еле улавливается глазом, так что трудно понять, имеем ли мы дело с непрерывным или дискретным световым сигналом. Иногда на этих лучах наблюдаются яркие световые точки, а также небольшие по протяжённости более яркие световые участки, достаточно чётко ограниченные. Эти точки или участки обычно отвечают совокупности узких плоскостей одного наклона, что видно при прямом рассмотрении поверхности кристалла. Световые лучи для различных зон на одном и том же кристалле существенно различаются по протяжённости, т.е. обладают неодинаковым значением  $\rho$  на другом своём конце. При этом световой рефлекс, как правило, угасает постепенно, то более, то менее быстро, в зависимости от конкретной зоны. В связи с тем что уловить его конец бывает затруднительно, величины  $\rho$  для пределов световых рефлексов округлялись до  $10'$ . Тенденция такова, что максимальная и минимальная длины световых сигналов присутствуют граням противоположных зон, т.е. зонам с различным пересыщением, существовавшим когда то около них. Таким образом, различная длина световых лучей

связана со строением поверхности граней, свидетельствуя о диапазоне изменения пересыщения вблизи соответствующих зон кристаллов.

При использовании лазера в качестве источника монохроматического света, направленного на пирамидальную поверхность кристалла под острым углом, на экране наблюдается отражённый от неё световой луч. Он состоит из чередующихся светлых и тёмных полосок приблизительно одинаковой ширины, перпендикулярных или близких к перпендикулярным к нему. Вместо полосок на отдельных сегментах отражённого лазерного пучка наблюдаются вытянутые светлые пятнышки, правильно чередующиеся с тёмными участками. Этот луч имеет различную яркость на своём протяжении, что зависит от плотности упомянутых светлых полосок или пятнышек, изменения их ширины на том или ином сегменте светового рефлекса. Иногда они сливаются вместе, образуя общее пятно. Световой луч, наблюдаемый в зрительной трубе гониометра, имеет интерференционную природу. На интерференционную природу наблюдаемых в зрительной трубе гониометра световых лучей впервые, по-видимому, указал А. И. Глазов [15]. Она не распознаётся из-за использования источника белого света — светового пучка большого размера с диаметром в нашем случае около 25 мм. Особенности наблюдаемого в зрительной трубе гониометра светового рефлекса, упомянутые выше, отражают немонотонность явлений интерференции, возникающую в связи с многообразием ростовых ступеней (неравномерным распределением по поверхности кристалла, вариациями в их толщинах и наклонах торцов). Медленное затухание этого рефлекса на его конце мы объясняем уменьшением интерференционных максимумов при их удалении от центральных максимумов. Кроме того, А. И. Глазов подчёркивал, что яркие точки на световых лучах можно ошибочно принять за сигналы от граней, в то время как они в действительности являются дифракционными максимумами.

Некоторые грани призмы  $m$  не дают световых сигналов. Их полярные координаты брали по отблеску, иногда весьма тусклому. Подобное отражение иногда даже трудно назвать отблеском. Найденные при этом параметры  $\varphi$  и  $\rho$  могут отличаться от их теоретического значения на несколько градусов. Иногда под биноклем можно различить, что тусклый характер поверхности вызван как бы её «изъеденностью», т. е. как будто она подверглась растворению, аналогично тому, что отмечалось в [8].

Вид изученных кристаллов кварца, их скульптура и описанные световые лучи не имеют ничего общего как с формами растворения кристаллов и гониометрическими картинками от них [13, 16], так и с формами равновесия кристаллов [11].

Несомненно, что разнообразие величин  $\rho$  для торцов ступеней на различных кристаллах, наличие многообразных ярких точек на световых лучах привело к среднестатистическому непрерывному графику в значениях  $\rho$ , усреднённых по числу измеренных кристаллов [17, 18].

Грани острых ромбоэдров также дают световые лучи. Хорошо различимые световые точки, отвечающие этим граням, обычно находятся у конца светового рефлекса с меньшим значением  $\rho$ . Указанные грани обладают ступенчатостью с наклоном в сторону основной призмы, т. е. наклоном, обратным к наклону ступенчатости от этой призмы. В этом — ещё одно подтверждение вывода [19] о том, что грани острых ромбоэдров являются самостоятельными простыми формами, а не совокупностью торцов ступеней на гранях призмы. Различные эшелоны макроступеней на гранях острых ромбоэдров несколько отличаются своим наклоном при

приблизительно одинаковом блеске, перемежаясь со ступенью, принадлежащей данным граням, так что эти ступени дают рядом расположенные яркие световые точки на фоне общего светового луча. Потому иногда бывает трудно понять, какая из данных точек характеризует основную грань. В таких случаях отсчёт  $\rho$  для неё контролировали по общему яркому отблеску грани и субъективному учёту при этом световой точки, наиболее близкой к соответствующей простой форме. Тусклость некоторых граней острых ромбоэдров приводит к тому, что трудно установить достаточно точно их значение  $\rho$ . Возможно, что и грани острых ромбоэдров замещены в том или ином случае вицинальными плоскостями. И. И. Шафрановский [14] считал, что грани ромбоэдров со сложными символами представляют собой всего лишь вицинальные грани от трёх или четырёх острых ромбоэдров с относительно простыми символами.

Изменение протяжённости световых лучей от зоны к зоне для граней одной простой формы слабо согласуется с изменением этой величины для граней другой простой формы. Получается, что вблизи граней разных простых форм в процессе их роста пересыщение изменялось по-разному.

Наряду с дискретными световыми лучами от конкретных простых форм на некоторых кристаллах в отдельных зонах наблюдаются световые лучи, которые захватывают всю область параметров  $\rho$  острых ромбоэдров в данной зоне и даже сливаются с лучом от грани призмы. Отсутствие разрывов между световыми лучами свидетельствует о том, что ступенчатость грани одной из простых форм фактически непрерывно переходит в ступенчатость грани другой простой формы.

В. В. Кушеев [18] подчёркивал различие в отражательной способности положительных и отрицательных основных ромбоэдров. П. С. Вадило [20] указывал, что грани призмы под гранями ромбоэдра  $r$  отличаются бóльшим блеском. Однако какие-либо единообразные отличия в яркости световых сигналов от граней ромбоэдров или разных граней призмы на наших кристаллах не удалось заметить.

Все изученные кристаллы разнообразны, в чём-нибудь один из них отличен от другого. При этом для них всех характерно отсутствие габитусных граней и углов наклона для торцов ступеней в интервале  $\approx 55^\circ < \rho < \approx 75^\circ$ , т. е. в интервале между величиной  $\rho$ , несколько превышающей этот параметр для основных ромбоэдров, и величиной  $\rho$ , близкой к характерному для важнейшего острого ромбоэдра. На призматических кристаллах наблюдаются лишь простые формы  $m$ ,  $R$  и  $r$ . Результаты измерения двух образцов представлены в табл. 1. Оба они имеют размер по оси  $c$ , равный 15–18 мм, у основания по оси  $a$  — 8–10 мм. Для всех зон обоих кристаллов, как правило, отмечены величины  $\rho$  только габитусных (основных) граней, сопоставимых по своей площади. Их символы нетрудно определить путём сравнения измеренных значений  $\rho$  с табличными для них [19, 21]. Значение  $\rho$  указаны также для ступеней, хотя бы и сравнительно узких, которые разделяют габитусные грани и имеют индивидуальный световой сигнал за пределами световых лучей.

*Призматически-пирамидальный кристалл* (см. табл. 1, рис. 1). В зонах IV–VI данного индивида от яркой световой точки, характеризующей грани основных ромбоэдров, отходят три световых луча, имеющих максимальную угловую протяжённость  $1^\circ$ – $2^\circ$  в зоне IV и минимальную ( $20'$ – $40'$ ) в зоне V. Наиболее отчётливая трёхлучевая световая звезда с одинаковой яркостью её лучей наблюдается в зоне IV, наименее различимая световая звезда — в зоне VI. Поскольку к появлению вициналей,

Таблица 1. Угловые параметры двух кристаллов кварца

Зона, φ	ρ граней и пределов световых лучей, Δ — их протяжённость				
Призматически-пирамидальный кристалл					
I, (30°)	R (51°47')	75°30' 75°10' ↔ 77°30' Δ = 2°20'	81°58' 78°30' ↔ 83°50' Δ = 5°20'	89°56' 88°40' ↔ 90°50' Δ = 2°10'	77°39'; 81°57' (левые трапецоэдры)
II, (90°)	r (51°47')	76°20' (отблеск)	—	89°33'; 89°58' 86°10' ↔ 90°00' Δ = 3°50'	—
III, (150°)	R (51°47')	75°04'; 77°07' (широкие ступени)	—	89°32' 78°30' ↔ 90°30' Δ = 12°00'	75°11' (левый трапецоэдр)
IV, (210°)	r (51°47')	76°10' (отблеск) 75°00' ↔ 78°40' Δ = 3°40'	—	89°37' 87°10' ↔ 91°40' Δ = 4°30'	—
V, (270°)	R (51°47')	—	81°10' 79°20' ↔ 83°40' Δ = 4°20'	89°52' 87°50' ↔ 90°40' Δ = 2°50'	—
VI, (330°)	r (51°47') (мелкая грань)	—	79°30' (отблеск) 78°20' ↔ 82°20' Δ = 4°00'	89°35' 86°10' ↔ 92°50' Δ = 6°40'	—
Пирамидальный кристалл					
I, (30°)	R (51°47'); 53°45' 51°40' ↔ 54°10' Δ = 2°30'	75°21' 75°10' ↔ 76°40' Δ = 1°30'	77°16'; 78°43' (две широкие ступени до и после предыдущей грани)		
II, (90°)	r (51°47') (мелкая грань)	74°13' 74°10' ↔ 78°10' Δ = 4°00'	81°50' 81°40' ↔ 85°50' Δ = 4°10'		
III, (150°)	R (51°47') 51°40' ↔ 52°10' Δ = 0°30'	75°20' 75°10' ↔ 79°40' Δ = 4°30'	—		
IV, (210°)	r (51°47')	75°03' 75°00' ↔ 85°50' Δ = 10°50'	83°39' (ступень)		
V, (270°)	R (51°47') 51°40' ↔ 55°20' Δ = 3°40'	75°26' 74°40' ↔ 79°00' Δ = 4°20'	78°51' (ступень)		
VI, (330°)	r (51°47') 51°40' ↔ 52°30' Δ = 0°50'	75°10' 75°00' ↔ 77°10' Δ = 2°10'	78°39' (ступень)		





Рис. 1. Призматически-пирамидальный кристалл кварца (табл. 1) со стороны зоны I.

Размер по оси  $c$  — 18 мм. Последовательно сверху вниз расположены грани ромбоэдра  $R$  (почти неразличимой), ромбоэдров  $\{50\bar{5}1\}$ ,  $\{30\bar{3}1\}$  и призмы  $m$ . Обращает на себя внимание гладкий характер граней трапецоэдров (примыкают слева к граням зоны I) на фоне штриховки граней  $\{30\bar{3}1\}$  и призмы  $m$ . Отсутствие штриховки в верхней части призмы — результат засветки кристалла при фотографировании. Видны грани соседних важнейших зон кристалла.

что грань призмы в зоне II состоит из двух широких террас, разделённых сопоставимой с ними по величине вичинальной плоскостью, обладающей несколько меньшим значением  $\rho$  (см. табл. 1). Это означает, что имело место случайное однократное слияние атомных ступеней на грани призмы в этой зоне с образованием указанной плоскости при длительном периоде её развития в условиях относительно постоянного пересыщения. Наибольшая протяжённость светового луча, связанного с гранью  $m$  в зоне III, отражает максимальное пересыщение в начале процесса роста и его длительное изменение вблизи этой зоны.

Все грани призмы имеют внешне почти одинаковую тонкую штриховку. У основания кристалла, как правило, грань призмы плоская или почти без штриховки. При приближении к вершине кристалла штриховка становится более выраженной. Это означает, что зарождение атомных слоёв происходило у основания кристалла, что вполне естественно, причём по мере движения по поверхности грани нарастает

их величине и крутизне ведёт к росту пересыщения, то приходим к выводу о повышенном пересыщении около зон IV–VI вблизи граней основных ромбоэдров при росте данного кристалла. С этим согласуется минимальная величина грани  $r$  в зоне VI.

Хорошо развитые гладкие плоскости трапецоэдров вблизи зоны I диагностируются по ярким и точечным световым рефлексам при величинах  $\rho$ , почти точно совпадающих с табличными значениями для трапецоэдров  $\{31\bar{4}1\}$  и  $\{51\bar{6}1\}$ . Параметр  $\rho$  для трапецоэдра  $\{51\bar{6}1\}$  вблизи зоны III заметно отличается от теоретического, очевидно, из-за низкого качества грани. Под бинокляром эта грань выглядит изъязвлённой, как будто подвергшейся растворению. Указанные данные дают основание полагать, что кристалл со стороны зон I–III находился при пониженных пересыщениях, в противоположность описанным выше зонам. Присутствие вблизи зоны III грани лишь одного трапецоэдра, по-видимому, является отражением того, что здесь пересыщение было несколько большим, чем вблизи зоны I.

Обращает на себя внимание то,

их слияние во всё более крупные ступени. Собственная штриховка грани, принадлежащей простой форме  $\{30\bar{3}1\}$  в зоне *I* (см. рис. 1), указывает на её самостоятельный слоевой рост.

*Пирамидальный кристалл* (см. табл. 1). Изолированный точечный световой сигнал от граней основных ромбоэдров в зонах *II* и *IV* — признак отсутствия вициналей на этих гранях. Незначительная длина однолучевого светового рефлекса в зоне *III* отражает малую крутизну вицинальных пирамид на грани этого ромбоэдра в данной зоне. Отмеченные факты свидетельствуют о пониженном пересыщении с этой стороны кристалла во время его роста. Минимальный размер грани простой формы *r* в зоне *II* по сравнению с другими её гранями как будто противоречит сказанному, указывая на повышенную скорость роста данной грани. Однако с этой гранью связан разориентированный с нею блок кристалла, т. е. она является дефектной уже на макроскопическом уровне, что и могло вызвать более быстрый её рост. Световые рефлексы от граней основных ромбоэдров в противоположных зонах *I*, *VI* и *V* также имеют однолучевой характер при неизменно яркой световой точке от самих ромбоэдров. Повышенное значение величины  $\rho$  на конце светового луча в этих зонах отражает сравнительно большой начальный наклон вицинальной пирамиды, что должно указывать на относительно высокое исходное пересыщение вблизи этих зон. Наличие широкой вицинальной грани, примыкающей к грани основного ромбоэдра в зоне *I*, по-видимому, является результатом того, что вблизи этой грани был период сравнительно постоянного пересыщения в начале её роста.

Выклинивание данного индивида определяет острый ромбоэдр  $\{30\bar{3}1\}$ . Световой рефлекс наибольшей протяжённости в зоне *IV* и несколько повышенная его длина в соседних зонах свидетельствуют в пользу относительно высокого первичного пересыщения вблизи этой стороны кристалла. Наряду с сигналом от основной грани острого ромбоэдра на световом луче в зоне *IV* зафиксированы световые точки со значениями  $\rho$ , равными  $79^{\circ}52'$ ,  $82^{\circ}25'$ ,  $82^{\circ}30'$ ,  $82^{\circ}40'$ ,  $84^{\circ}02'$  и  $85^{\circ}00'$ . Большой световой луч и наличие нескольких эшелонов мелких ступеней разного наклона следует считать признаком значительного изменения пересыщения здесь.

Присутствие в зоне *I* двух плоских ступеней с близкими значениями  $\rho$ , примыкающих к грани острого ромбоэдра с двух сторон, может быть результатом всего двух слияний атомных ступеней между собой на этой грани. Это свидетельствует в пользу предположения о двух периодах постоянного и сравнительно малого пересыщения в данной зоне.

Для всех граней острого ромбоэдра  $\{30\bar{3}1\}$  на этом кристалле характерна практически одинаковая грубая и неравномерная ступенчатость с символом торцов, соответствующим призма. Судя по масштабам ступенчатости, второй кристалл рос при более высоком влиянии диффузионного потока к нему, чем первый.

Гониометрические измерения отражают характер пересыщения и его эволюцию около конкретных граней разных простых форм в процессе возникновения индивидов кварца. Говорить о преимущественном направлении движения маточного раствора в обоих случаях трудно.

**Марказит.** Его кристаллы были взяты из кембрийских глин Ленинградской области и описывались нами в [22]. При этом упоминалось лишь наличие макроскопических ступеней на гранях ромбической дипирамиды  $\{111\}$ , габитусной для этих кристаллов, и то, что грань первого пинакоида представляет собой ступенчатую

вицинальную пирамиду. Эти кристаллы образуют сросток, из которого отдельные индивиды выступают своей остроконечной вершиной (рис. 2). На рис. 2б обозначены:  $a$  — первый пинакоид,  $b$  — второй пинакоид,  $s$  — дипирамида  $\{111\}$ ,  $v$  — ромбическая призма  $\{210\}$ . Ось остроконечной вершины, по измерениям, соответствует третьей кристаллографической оси в установке В. Гольдшмидта для кристаллов марказита [23]. Его установка использовалась в работе [22] и сохранена здесь. В результате для ромбической дипирамиды  $\{111\}$   $\varphi = 58^{\circ}02'$ ,  $\rho = 57^{\circ}07'$ .

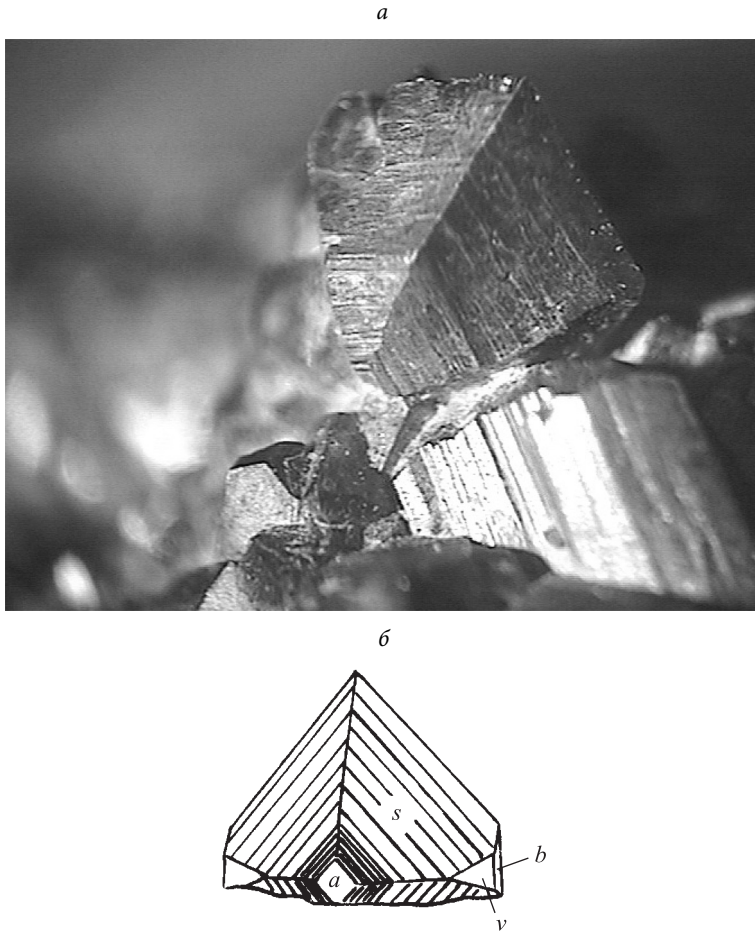


Рис. 2. Кристалл марказита из ленинградских кембрийских глин.  
Размер — около 10 мм

$a$  — общий вид кристалла;  $b$  — его схематическая зарисовка.

Световые сигналы от граней формы  $\{111\}$  имеют вид сравнительно небольших и ярких пятен. Для ступеней на гранях  $\{111\}$  обычны узкие торцы. Иногда эти ступени сливаются, и их торцы преобразуются в более или менее плоские широкие грани. В некоторых случаях на гранях дипирамиды наблюдаются лишь две-три ступени с относительно узкими торцами и ярким отблеском от них в трубе гониометра. Как правило, кристалл выступает из их сростка лишь одной половиной, причём он наклонён

вершиной единичной дипирамиды  $\{111\}$  к основанию сростка. Поэтому лишь две из четырёх граней дипирамиды  $\{111\}$ , примыкающие к вершине кристалла, доступны для изучения. В связи с этим число изученных кристаллов  $N$  не согласуется с числом измеренных граней вицинальных пирамид, т. е. торцов ступеней  $n$  (табл. 2). Вычисле-

Таблица 2. Результаты измерений торцов ступеней на гранях  $\{111\}$  кристаллов марказита из ленинградских кембрийских глин

Простая форма	$N$	$n$	$\alpha$	$\sigma_\alpha$	$\varphi$ изм.	$\rho$ изм.	Символ ступени	$\varphi$ теор.	$\rho$ теор.
st 1	4	5	$9^\circ 58'$	$24'$	$83^\circ 30'$	$82^\circ 00'$	$\{611\}$	$84^\circ 03'$	$82^\circ 44'$
st 2	6	12	$19^\circ 24'$	$23'$	$77^\circ$	$75^\circ$	$\{311\}$	$78^\circ 45'$	$75^\circ 00'$

Примечание.  $\alpha$  — средняя величина угла между нормалью к данной ступени и к грани первого пинакоида.  $\sigma_\alpha$  — среднеквадратичная ошибка определения угла  $\alpha$ .

ния символов торцов ступеней двух наклонов st 1 и st 2 (табл. 2) проводились по уравнениям из работы [24]. Данные простые формы отсутствуют среди известных для марказита [23, 25]. Типичное сечение кристалла марказита через грани (100) и (111), т. е. вдоль пояса  $[0\bar{1}1]$ , представлено на рис. 3. Отблески от торцов с другими ориентациями ненадежны, не повторяются регулярно от кристалла к кристаллу. Наблюдаются также неровные участки с расплывчатым отблеском, отклоняющиеся по своему положению от указанного пояса  $[0\bar{1}1]$ . На одном и том же кристалле на одной грани дипирамиды удаётся уловить отчетливый отблеск от торцов ступеней, на другой грани — нет. Бугорок роста на грани первого пинакоида перекрывает всю грань и представляет собой четырёхгранное образование. Каждая грань этого бугорка является ступенчатой, составленной из узких слоёв с наклонными торцами, которые параллельны по ориентации кристаллографическим осям II и III. Ввиду тусклости отблеска от этих торцов их полярные координаты зафиксировать не удалось. Скорее всего, эти торцы имеют иррациональные символы вида  $\{h0k\}$  и  $\{hk0\}$ .

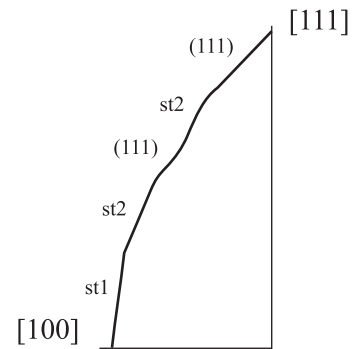


Рис. 3. Сечение кристалла, изображённого на рис. 2, б, в зоне нормалей к граням (100) и (111)

### Обсуждение результатов

Гониометрические рефлексии отражают присутствие и число вицинальных плоскостей, отличие их полярных координат от основной грани, т. е. крутизну вицинальных пирамидок, их искривлённость и ступенчатость, в конечном итоге — величину пересыщения раствора и его относительное изменение в процессе роста у различных граней кристалла. Имеются возможности для выявления особенностей образования минеральных индивидов на основе гониометрии. Что касается кварца, то его гониометрическое изучение нельзя считать законченным.

Привлекают внимание следующие вопросы: в каких случаях торцы ступеней приобретают рациональные малочисленные символы, характерные для простых

форм с их выявленным морфологическим рангом, а в каких случаях торцы ступеней отличаются рациональными символами со сравнительно небольшими индексами, однако превышающими те, что присущи данным кристаллам, и не являются оправданными с рентгеновской точки зрения? Наконец, в каких случаях торцы ступеней имеют явно иррациональный характер? Аналогично тому, что обычно наблюдается на кристаллах кварца, торцы ступеней на кристаллах марказита, описанные выше, также не принадлежат к атомарным сеткам его структуры, обладающих зафиксированной для них рентгеновской интенсивностью  $I$  [26]. На примере других минералов также известно, что торцы ступеней могут либо обладать символами с малочисленными индексами при установленной рентгеновской интенсивности  $I$  соответствующих им атомных сеток, либо не обладать ими.

Торцам ступеней с их индивидуальными световыми рефлексами и приписывают в литературе рациональные символы с меньшими или большими индексами. Объяснение того, почему торцы ступеней приобретают символы с подобными индексами, нехарактерными для обычных граней кристаллов данного вещества, попытался дать П. Хартман [27]. Однако его теория выглядит недостаточно ясной.

Интересно было бы установить, не соответствует ли определённый угол наклона торцов ступеней, или хотя бы небольшой интервал наклона этих торцов, одному значению пересыщения в массе раствора, другой наклон торцов или другой небольшой интервал их наклонов — иному пересыщению. Интуитивно кажется, что большему пересыщению должны соответствовать ступени с более крутыми склонами. Ответ на такой вопрос может дать только эксперимент.

Сведения о постоянном наличии редких простых форм в облике кристаллов и устойчивого различия в характере торцов ступеней на разных кристаллах одного и того же минерала могут помочь в указании на то, из какой перспективной на конкретный химический элемент рудной жилы попали в исследуемую россыпь кристаллы данного минерала.

Автор благодарен сотруднице геологического факультета СПбГУ В. Ф. Чернышёвой за предоставление описанных кристаллов кварца.

## Литература

1. Глазов А. И., Трейвус Е. Б., Михайлов В. В. Световые фигуры от граней роста кристаллов и их использование в онтогенических исследованиях // Зап. Российск. минер. об-ва. 2000. Ч. 129, № 5. С. 95–102.
2. Кораго А. А. Использование кристалломорфологии кварца из развалов для определения залегания хрусталоносных гнёзд // Зап. Всесоюзн. минер. об-ва. 1968. Ч. 97, вып. 3. С. 637–640.
3. Мокиевский В. А. К вопросу об искажении облика природных кристаллов кварца // Зап. Всесоюзн. минер. об-ва. 1953. Ч. 82, вып. 3. С. 173–185.
4. Григорьев Д. П., Жабин А. Г. Онтогенез минералов (индивиды). М.: Наука, 1975. 339 с.
5. Клипов В. А., Гавриленко В. М. Морфология искусственных кристаллов кварца и движение кристаллообразующей среды // Новые идеи в генетической минералогии / отв. ред. Д. П. Григорьев, Н. П. Юшкин. Л.: Наука, 1983. С. 77–82.
6. Эшкин В. Ю., Карякина Т. А. Некоторые особенности образования кристаллов кварца в пегматитовых жилах // Зап. Всесоюзн. минер. об-ва. 1971. Ч. 100, вып. 4. С. 408–413.
7. Sunagawa I. Crystals: growth, morphology and perfection. Cambridge: Cambridge University press, 2005. 295 p.
8. Антонов В. А., Тарантов А. С. Кристалломорфологические особенности кварца как показатель направления движения минералообразующих растворов (на примере Зырянского месторождения) // Тр. Ин-та геолог. наук Казахской ССР. 1967. Т. 20. С. 126–134.

9. *Вадило П. С.* Новое правило для определения положительного ромбоэдра кварца // Сообщения Таджикского филиала АН СССР. 1947. Вып. 1. С. 32–34.
10. *Черепанова Т. А.* Флуктуационный механизм неустойчивости растущих граней кристаллов // Докл. АН СССР. 1976. Т. 226, № 5. С. 1066–1068.
11. Современная кристаллография. Т. 3. Образование кристаллов / отв. ред. Д. Е. Тёмкин. М.: Наука, 1980. 407 с.
12. *Чернов А. А.* Влияние течения внутри пограничного слоя на морфологическую устойчивость вицинальной грани // Кристаллография. 1992. Т. 37, № 1. С. 12–25.
13. *Шафрановский И. И.* Кристаллы минералов. Кривогранные, скелетные и зернистые формы. М.: Гослитгиздат по геологии и охране недр, 1961. 332 с.
14. *Шафрановский И. И.* Кварц горы Неройки (Приполярный Урал). М.; Л.: Изд-во Наркомата местной промышл., 1937. 40 с.
15. *Глазов А. И.* Методы морфометрии кристаллов. Л.: Недра, 1981. 147 с.
16. *Ракин В. И.* Криволинейные поверхности растворения как отражение физико-химических свойств структуры кристалла // Кристаллография. 2011. Т. 56, № 2. С. 314–323.
17. *Карякина Т. А.* О правиле Самойлова для кристаллов кварца // Зап. Ленингр. горного ин-та. 1968. Т. 54, вып. 2. С. 87–90.
18. *Кушеев В. В.* Морфология и генезис кристаллов кварца из камерных пегматитов Вольни. Киев: Наукова думка, 1982. 94 с.
19. *Трейвус Е. Б.* О морфологическом значении простых форм в важнейших (вертикальных) поясах кристаллов кварца // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 7: Геология, география. 2013. Вып. 4. С. 24–32.
20. *Вадило П. С.* Существуют ли грани острейших ромбоэдров у кристаллов кварца? // Сообщения Таджикского филиала АН СССР. 1947. Вып. 2. С. 15–17.
21. *Дэна Дж. Д., Дэна Э. С., Фрондель К.* Система минералогии. Т. III. Минералы кремнезема / пер. с англ.; под ред. П. П. Смолина. М.: Мир, 1966. 430 с.
22. *Трейвус Е. Б.* О кристалломорфологии марказита // Зап. Российск. минер. об-ва. 2011. Ч. 140, № 2. С. 84–92.
23. *Дэна Дж. Д., Дэна Э. С., Пэлач Ч., Берман Г., Фрондель К.* Система минералогии. Т. I, 1-й полутом / пер. с англ.; под ред. Д. П. Григорьева. М.: Издатинлит, 1951. 608 с.
24. *Булах А. Г.* Графика кристаллов. М.: Недра, 1971. 112 с.
25. *Goldschmidt V.* Atlas der Kristallformen. Heidelberg: Carl Winters Universitätsbuchhandlung, 1923. Bd VI. Text. 126 S.
26. *Powder Diffraction Files (ICDD).* Swarthmore (USA), 1997. Plate 37-04755.
27. *Хартман П.* Образование граней высоких индексов в ионных кристаллах в результате слоистого роста // Рост кристаллов / отв. ред. А. А. Чернов. Ереван: Ереванский университет, 1975. Т. 11. С. 154–157.

Статья поступила в редакцию 26 сентября 2013 г.

#### Контактная информация

*Трейвус Евгений Борисович* — кандидат геолого-минералогических наук; e-mail: evgtrivos@mail.ru

*Treivus E. B.* — Candidate of Geological and Mineralogical Sciences; e-mail: evgtrivos@mail.ru